

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

FUKT I UTVÄNDIGT ISOLERADE PLÅTTAK

MOISTURE TRANSFER IN STEEL DECK

INGEMAR SAMUELSON

RAPPORT 67

LUND 1976

FUKT I UTVÄNDIGT ISOLERADE
PLÅTTAK

av

Ingemar Samuelson, civilingenjör, Kr

Akademisk avhandling som för avläggande av
teknologie doktorsexamen vid tekniska fakul-
teten vid universitetet i Lund kommer att
offentligen försvaras å hörsal V:A fredagen
den 23 april 1976 kl 09.15.

INNEHÅLL

Förord	5
Sammanfattning	6
Summary	10
Beteckningar/List of Symbols	15
1 Arbetets målsättning	19
2 Inledning och bakgrund	21
2.1 Beskrivning av taktypen	21
2.1.1 Det lätta isolerade plåttaket	21
2.1.2 Marknadsandel	26
2.1.3 Takets tekniska funktion	27
2.2 Beskrivning av några skadetyper	28
2.2.1 Dropp från taket	28
2.2.2 Luftläckage genom taket. Kondens mot taktäckningen	30
2.2.3 Läckage	32
2.2.4 Blåsbildning i tätskikt av papp	32
3 Fukttransportmekanismer	35
3.1 Fukttransport genom den bärande plåten	35
3.1.1 Diffusion genom överlapp	36
3.1.2 Konvektion genom överlapp	39
3.1.3 Rinnande vatten genom överlapp	42
3.1.4 Fukttransport genom överlapp. Sammanfattning	43
3.2 Fukttransport genom värmeisoleringsmaterial	44
3.2.1 Diffusion genom värmeisoleringsmaterial	46
3.2.2 Konvektion genom värmeisoleringsmaterial	53
3.2.3 Övriga transportmekanismer i värmeisoleringsmaterialet	59
3.2.4 Försök med kondensation i värmeisoleringsmaterial	59
3.3 Transport i springor mellan värmeisoleringskivor	76

3.3.1	Diffusion i springor mellan värmeisoleringsskivorna	77
3.3.2	Konvektion i springor mellan värmeisoleringsskivorna	78
3.3.3	Transport p g a tyngdkraft i skarvar	83
3.3.4	Kondensation i springor i skarvar. Laboratorieförsök	84
3.3.5	Fukttransport i skarvar. Sammanfattning	88
4	Fuktbalans i tak	89
4.1	Fuktbalans i plåttak	90
4.2	Faktorer som inverkar på mängden kondensat	94
4.2.1	Skillnad i ånghalt inne - tätskikt	94
4.2.2	Plåtens förmåga att hindra luftgenomgång	97
4.2.3	Isolermaterialets och klisterskiktets fuktegenskaper	99
4.2.4	Kondensationsperiodens längd	100
4.3	Konsekvenser av fuktvariationerna i taket	118
4.3.1	Dropp	119
4.3.2	Värmeisoleringsförsämring	119
4.3.3	Nedbrytning av material eller förändring av vidhäftning p g a upprepad nedfuktning, frysning etc	121
5	Mätningar	123
5.1	Fältmätningar	123
5.1.1	Mätmetoder	123
5.1.2	Mätobjekt	124
5.1.3	Mättid	127
5.1.4	Mätresultat	127
5.1.5	Resultatdiskussion	149
5.2	Laboratoriemätningar	150
5.2.1	Fuktbalans i plåttak vid kontrollerade yttre förhållanden	151
5.2.2	Inverkan av olika isoleringsmaterial	152
5.2.3	Inverkan av olika kondensationsperioder	153



5.2.4	Inverkan av luftrörelser	155
5.2.5	Inverkan av olika ånghalt inne	156
6	Konstruktionskriterier	159
6.1	Kriterium om värmeisoleringsförsämring	160
6.2	Kriterium om dropp från taket	164
6.3	Kriterium om vidhäftningsförsämring	165
	Litteratur	167

FÖRORD

Föreliggande rapport behandlar fuktvandring i det lätta isolerade plåttaket. Rapporten har utformats så att den är lättillgänglig för praktiskt bruk. Avsnitten om fuktvandringsmekanismer har därför medvetet fått lärobokskaraktär. Mycket av materialet är känt men medtaget för att underlätta förståelsen. I rapporten visas med talrika exempel storleksordningen hos fuktvandring vid kända randvillkor. Dessa exempel är i texten markerade dels med tätare radavstånd dels med en punkterad linje i vänstermarginalen.

Arbetet ingår som en tillämpningsdel i den fuktforskning som bedrivs vid Tekniska Högskolan i Lund och har bl a initierats av ett forskningsprogram av Stålbyggnadsinstitutet 1971. Arbetet har till största delen bekostats av Statens Råd för Byggnadsforskning.

Jag vill tacka alla som hjälpt till med arbetet, främst professor Lars Erik Nevander som inspirerat och varit till stor hjälp. Jag vill även tacka Lars Ohlsson som hjälpt till vid fält- och laboratoriemätningar, Lilian Johansson som ritat figurer och Lena Thorell som renskrivit manuskriptet samt alla som givit synpunkter på arbetet.

Lund i mars 1976

Ingemar Samuelson

SAMMANFATTNING

Denna rapport behandlar fukt i det utvändigt isolerade plåttaket, hur fukten kommer in i taket, vilka transportmekanismer som driver den och i vilken mån fukten kan orsaka skada.

I inledningen (kap 2) beskrivs takets uppbyggnad och ingående material. Där tas också upp några skador som kan anses vara typiska för taket om än inte särskilt vanliga.

- dropp från taket
- luftläckage genom taket. Kondens
- vattenläckage
- blåsbildning i taktäckning av papp

Kap 3 beskriver grundläggande förutsättningar för fukttransport. Dessa behandlas för varje del av taket för sig i följande uppdelning.

- fukttransport genom den bärande plåten
- fukttransport genom värmeisoleringsmaterialet
- fukttransport i skarvar mellan värmeisoleringsskivor

För varje del tas upp förutsättningar för

a/ transport i ångfas genom diffusion

$$g = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

där

g = transporterad fuktmängd

D = transportkoefficient

$\frac{dc}{dx}$ = ånghaltspotential

b/ transport i ångfas genom konvektion

$$g = V \cdot (c_1 - c_2) \quad (5)$$

där

g = transporterad fuktmängd

V = luftvolym

$(c_1 - c_2)$ = skillnad i ånghalt längs transportvägen

c / transport i vätskefas p g a kapillärsugning eller tyngdkraft.

Med en rad enkla beräkningsexempel och med resultat från laboratorie-försök visas hur konstruktionen fungerar och vilka transportmekanismer som har störst betydelse.

Fukttransporten genom överlapp mellan bärande plåtar eller genom hål i plåtarna sker huvudsakligen som konvektion. Transporten uppåt genom värmeisoleringen vid kondensation eller nedåt vid uttorkning sker huvudsakligen som diffusion. I springorna i skarvarna mellan värmeisoleringskivor transporteras fukten uppåt på grund av diffusion eller konvektion och nedåt dessutom på grund av tyngdkraft.

Speciell uppmärksamhet ägnas förhållandena vid kondensation i värmeisoleringen. Placeringen av värme-flödesmätare enligt figur 16 kan ge ett mätt värme-flöde som för mineralull är 25% och för kork och styrencellplast ca 2% högre än värme-flödet i isoleringen.

I kap 4 ställs de olika fukttransport-sätten samman i en beskrivning av fuktbalansen vid varierande ute- och inneklimat. Först beskrivs sådan fuktbalans för ett gasbetongtak som har långsamma fuktvariationer, fig 30. Sedan visas fuktförhållanden i ett mineralulls-isolerat tak. Ånghalten c inne i plåtkanalen i taket blir

$$c = c_0 + G \cdot \Delta\tau / V \quad (16)$$

där

c_0 = ånghalten vid tiden τ_0

G = fukttillskott under tiden $\Delta\tau$

$\Delta\tau$ = tiden från τ_0 till τ

V = plåtkanalens volym

Fukttillskottet G är beroende dels av fuktutbytet med inneluften dels av fukttransporten upp eller ner i värmeisoleringen. Ekv 16 säger att om luftutbytet är stort mellan plåtkanal och inneluft blir ånghalten c lika med ånghalten inne. Om luftutbytet är litet bestäms ånghalten c av fukttransporten uppåt eller nedåt i värmeisoleringen.

Ånghaltsvariationer under ett dygn med kraftigt varierande uteklimat kan ha det utseende som visas av figur 33. Under dygnets varma timmar tillförs fukt från värmeisoleringen. Under natten sjunker ånghalten.

Det är för takets funktion viktigt att veta mängden kondensat. I kap 4.2 beskrivs följande faktorer som bestämmer fuktmängden i taket

- skillnaden i ånghalt inne - tätskikt
- plåtens eller fuktspärrens förmåga att hindra luftutbyte mellan plåtkanal och inneluft
- isolermaterialets och klisterskiktets egenskaper
- kondensationsperiodens längd

De tre första punkterna bestäms i huvudsak av konstruktionens utformning och av verksamheten i lokalen. Den sista punkten är i huvudsak beroende av uteklimatet. Så länge temperaturen på tätskiktet är tillräckligt låg kommer fukt att vandra uppåt in i taket.

Tillräckligt låg tätskiktstemperatur får man dels då utetemperaturen är under noll och ytan inte är utsatt för direkt solstrålning dels då taket är täckt av snö.

Uppgifter om frysperioder kan erhållas ur meteorologiska data. Uppgifter om snö på tak och dess varaktighet saknas. Därför har ett datorprogram konstruerats som simulerar snö på tak, snöfall, avblåsning och smältning. Ur datorprogrammet kan man få uppgifter på snöns varaktighet på tak i olika delar av landet.

Den dimensionerande kondensationsperiodens T_k längd har uppskattats efter studier av frysperioder och perioder med snö på tak till

i Sydsveriges kustområden	10 - 30 dagar
i Sydsveriges inland, Svealand och Norrlands kustland	30 - 80 dagar
i Övriga Norrland	80 - 150 dagar

I kap 5 redovisas mätningar dels på tak i byggnader dels på laboratorietak. Mätningarna visar att det finns fuktvariationer i taket. Dessa fuktvariationer är tydligast i tak isolerade med mineralull, men de finns även i tak med kork eller cellplast.

I kap 6 slutligen ges kriterier för en fuktteknisk dimensionering av taket. Det första kriteriet gäller värmeisoleringsförsämring under kondensation. Ur ett enkelt nomogram kan man uppskatta isoleringsförsämringen vid dimensionerande kondensationsperiod för olika ånghaltsskillnader inne - tätskikt. Försämringen orsakar ökade uppvärmningskostnader och dessa skall ställas i relation till kostnaden för antingen tjockare isolering eller fuktspärr.

Det andra kriteriet gäller dropp. Förekomsten av fukt i taket innebär alltid en risk för dropp under extrema förhållanden. Om sådant inte kan accepteras finns följande två åtgärder

- ångspärr
- vattenavledning på takets undersida.

Om man vill minska risken för dropp utan att vidta dessa åtgärder kan man

- lägga isoleringen i flera lager med förskjutna skarvar
- hellre använda mineralull än kork och cellplast
- kräva stor noggrannhet vid läggningen.

Det sista kriteriet i kap 6 gäller vidhäftningsförsämring och beständighet. Fukten kan på sikt orsaka egenskapsförändringar om man inte är medveten om problemen vid val av material.

SUMMARY

This report deals with moisture transfer in steel deck. It describes how moisture gets into the roof, the transport mechanisms and the risk of damages.

The introduction (Chapter 2) describes the construction of the roof and the materials used. Some typical but not very common moisture-damages are pointed out:

- waterdripping from the roof
- air-leakage through the roof and condensation
- water-leakage
- blisterings in roofing-felt.

Chapter 3 contains the basic conditions for moisture-transfer. They are described for the parts of the roof one by one as follows:

- moisture transfer through the steel plate
- moisture transfer through the heat insulation
- moisture transfer in the joints between the heat insulation slabs.

The chapter gives the assumptions for transfer by

a/ diffusion

$$g = -D \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

where

g = density of moisture-flow rate

D = coefficient of moisture-transfer

$\frac{dc}{dx}$ = potential of vapour-concentration

b/ moisture-convection (moisture-transfer by streaming air)

$$g = V \cdot (c_1 - c_2) \quad (5)$$

where

g = the moisture transport

V = volume of air

$c_1 - c_2$ = the difference in vapour concentration between point 1 and 2

c/ capillary-suction and also running water.

It is shown in calculated examples and in the results from laboratory tests how the roof functions with regard to moisture and which of the transport mechanisms that are the most important.

The moisture-transfer through the overlaps in the plates is mainly moisture-convection. The moisture-transfer through the heat insulation is mainly diffusion.

In the joints between the insulation slabs the moisture-transfer is diffusion and convection and, when frozen condensate melts, water running.

There is a special study of the heat insulation deterioration during condensation. The more moisture that moves up into the insulation the greater is the heat flow through the roof, see fig 17 - 21. The measurements of the heat-flow according to figure 16 however, may give a higher measured value than the heat flow through the insulation. It is shown that this increase in measured flow is 25% for mineral-wool insulations and 2% for cork and polystyrene.

Chapter 4 describes the moisture-balance in a roof insulated with lightweight concrete, fig 30, and a roof insulated with mineral wool.

The vapour concentration c in the plate-duct in the steel deck is given by:

$$c = c_0 + G \cdot \Delta\tau/V \quad (16)$$

where

c_0 = the vapour concentration at $\tau = \tau_0$

G = the moisture that moves into the duct during the time $\Delta\tau$

$\Delta\tau$ = the time from τ_0 to τ

V = volume of the duct

The moisture-addition G depends on both the moisture exchange between the duct and the indoor air and the moisture-transfer into or out from the heat insulation. Eq 16 says that a big air-flow through the overlaps in the plates gives the indoor climate in the duct. If there is a very small or no air-flow the vapour concentration c depends on the moisture transport in the heat insulation.

Figure 33 shows the variation in the vapour concentration c in a steel deck with mineral wool during some days. When the sun shines on the roof the vapour concentration increases and during the cold night it decreases to a value below the indoor concentration.

It is important to know the amount of condensate. Otherwise it is impossible to calculate the danger of damages. Chapter 4.2 gives the following factors that determine the moisture content caused by condensation.

- the difference between vapour concentration indoor and maximum vapour concentration at the roofing
- the air-flow through joints and ducts in the plates
- the material characteristics of the heat insulation and the asphalt
- the time for condensation

The first three points are determined by the construction and by the activity in the building. The last point is mainly determined by the outdoor climate. As long as the temperature on the roofing is low enough moisture is transported into the roof. Such a low temperature is obtained partly when the outer temperature is below zero and when there is no sun radiation partly when the roof is covered with snow.

There are meteorological measurements on temperatures but there is no information on snow on roofs or the duration of snow on roofs. Therefore the weather has been simulated on a computer and this simulation gives information of temperatures, snow, snow-melting and snow-duration for roofs in different climates.

The length of the dimensioning condensation time T_k has been estimated after meteorological studies and snow simulation

the coast of southern Sweden	10 - 30 days
the rest of southern Sweden, Svealand and the coast of Norrrland	30 - 80 days
the rest of Norrrland	80 - 150 days

In chapter 5 are given the results from measurings both on roofs in use and on a laboratory roof. The measurings show that there is moisture transfer in steel deck. The variations of moisture are faster in roofs with mineral wool insulations than in cork or polystyrene.

Finally chapter 6 gives the moisture criterions for dimensioning. The first criterion concerns the heat flow increase during condensation. In a nomogramme it is possible to find the heat flow increase from the length of the dimensioning condensation time and the difference in vapour concentration indoor and at the roofing. The heat flow increase gives a higher heating-cost in the building which should be related to the cost of a thicker insulation or a moisture-barrier.

The second criterion regards water-dripping. There is always moisture in the roof and a risk of water-dripping. If this can not be accepted there are two possibilities:

- moisture barrier
- inside gutter

If it is enough to lower the risk of water-dripping one of the following things can be done:

- use of insulation in two layers with displaced joints
- mineral wool instead of cork or polystyrene
- better control during the work on the roof.

The last criterion in chapter 6 concerns the durability of the roof. The moisture can destroy materials and long-time exposure to water may cause corrosion, deterioration or other damages.

ANVÄNDA BETECKNINGAR / LIST OF SYMBOLS

A	yta/area	m^2
A, B, C, D, E, F	konstanter för kurvpassning/ constants for curve fitting	
a	temperaturledningstal/thermal diffusivity	m^2/s
B _o	specifik permeabilitet/specific permeability	m^2
b	spaltvidd/width of joint	m
C _p	specifikt värme/specific heat capacity	J/kg K
C _{luft}	koefficient/coefficient = $\frac{g}{a \cdot v \cdot T_m}$	
c	ånghalt/vapour concentration	kg/m^3
c _s	mättnadsånghalt/maximum vapour concentration	kg/m^3
D	diffusivitet/vapour diffusivity	m^2/s
d	avstånd i transportriktningen/distance in the direction of the flow	m
G	fuktflöde/moisture flow rate	kg/s
g	fuktflödestäthet/density of moisture flow rate	$kg/m^2 s$
g _s	fuktflöde per längdenhet genom en skarv/ moisture flow rate per unit of length through a joint	kg/m s
g	tyngdacceleration/acceleration of free fall	$9,81 m/s^2$
h	höjd/height	m
k	värme genomgångstal/heat transmission coefficient	$W/m^2 K$
l	längd/length	m
M	molekylvikt/weight of molecule	kg/mol
M	värmemotstånd i konstruktion/heat resistance in structure	$m^2 K/W$

m	värmemotstånd/heat resistance	$\text{m}^2\text{K/W}$
p	tryck/pressure	Pa
Q	luftflöde/air-flow	m^3/s
q	värmefflödestäthet/density of heat flow rate	W/m^2
R	allmänna gaskonstanten/the gas-constant	J/mol K
S	vattenmängd per ytenhet/water per square unit	kg/m^2
s	översätttnadsgrad/super saturation = $= \frac{w + \rho'}{\rho_0}$	-
T_k	kondensationstid/time of condensation	dygn/days
T	temperatur/temperature	K
t	temperatur/temperature	$^{\circ}\text{C}$
V	volym/volume	m^3
v	lufthastighet/wind velocity	m/s
w	fukttinnehåll, fukthalt/moisture content	kg/m^3
x	avstånd/distance	m
z	ångmotstånd/diffusion resistance	s/m
α	värmeövergångstal/surface coefficient of of heat transfer	$\text{W/m}^2\text{K}$
γ, ρ	volymvikt/density	kg/m^3
δ	ånggenomsläpplighetskoefficient/coefficient of vapour conductivity	m^2/s
η	dynamisk viskositet/dynamic viscosity	Ns/m^2
ϕ, Φ	relativ ånghalt/relative humidity	%
Λ	värmegenomföringstal/heat transmission coefficient excl surface	$\text{W/m}^2\text{K}$
λ	värmeledningstal/thermal conductivity	W/m K
ν	kinematisk viskositet/kinematic viscosity	m^2/s
μ	koefficient i ekv 6/coefficient in equation 6	-

μ	diffusionsmotståndsfaktor/diffusion resistance factor	-
τ	tid/time	s dygn/days
Nu	Nusselts tal/Nusselt number	-
Ra	Rayleighs tal/Rayleigh number	-

1 ARBETETS MÅLSÄTTNING

Föreliggande arbete behandlar fuktbalans i lätta, isolerade plåttak. Arbetet berör de fysikaliska samband som styr fuktförloppen men har en uttalat praktisk inriktning. Målsättningen är att kartlägga fuktförhållandena i plåttaket vid olika yttre förutsättningar, samt att ge rekommendationer beträffande konstruktionens uppbyggnad. Det normala plåttaket har nämligen ingen fuktspärr och det har saknats välgrundade regler för bedömning av fuktspärrens vara eller inte vara.

2 INLEDNING OCH BAKGRUND

2.1 BESKRIVNING AV TAKTYPEN

2.1.1 Det lätta isolerade plåttaket

Konstruktionen av det lätta isolerade plåttaket visas i fig 1. De här använda benämningarna profilbotten, profiltopp, plåtkanal, spalt och skarv framgår också av figuren.

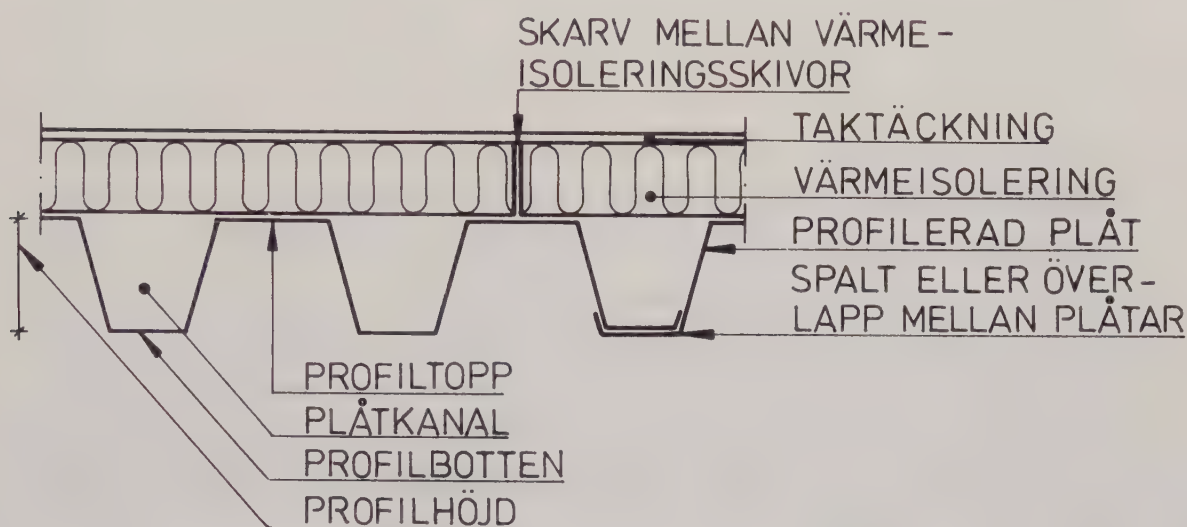


Fig 1. Det lätta isolerade plåttaket.

Taket består av tre delar, en bärande, en värmeisolerande och en vattenisolerande del. Den första funktionen uppfylls av den profilerade plåten. Denna läggs antingen på takåsar eller direkt på primärbärverket. Plåten är antingen av kallvalsat, förzinkat stål eller av aluminium. Plåtens dimensioner varierar med materialet med spännvidden och med upplagssättet. Två profilhöjder är dominerande dels 45 - 50 mm som används företrädesvis då plåten ligger på ett sekundärt åsbärverk och dels 90 - 120 mm som används vid stora spännvidder. Plåtarna läggs i längder på upp till 15 m, vid specialtillverkning ännu längre och med en bredd som varierar mellan 600 mm och 750 mm beroende på profilhöjden och på överlappets bredd. Plåtarna fogas i sidöverlapp med spik, blindnit och fästes till upplag med självgående skruv, skjutspik m m. Det är också möjligt att svetsa samman plåtarna även om metoden inte används i Sverige.

Plåten bildar underlag för värmeisoleringen och för att kunna klistra denna skall profiltoppen ha tillräcklig bredd. Upplagsytan för klistrade isoleringsskivor bör vara minst 33%. En alltför bred profiltopp innebär emellertid risk för buckling och man har satt gränsen 150 mm vid plåttjockleken 0,8 mm. För att öka plåtens bärighet har man på senare tid försett flänsar och liv med små veck i plåtriktningen. Därigenom styvas plåten upp och risken för buckling minskar. Resultatet blir att man kan använda mindre plåttjocklek vid samma profilhöjd och oförändrade upplagsförhållanden. Från fuktsynpunkt ändras dock i princip ingenting. Den enda tänkbara skillnaden är att vecken innebär att otätheter i överlappet ökar. De här beskrivna mätningarna gäller släta plåtar utan veck.

Värmeisoleringen utgörs vanligen av hårda mineralullsskivor, expanderad kork eller cellplast. Den vanligaste metoden att fästa värmeisoleringen mot plåten är att klistra med varm asfalt. I vissa fall behöver man emellertid komplettera med någon typ av mekanisk fästarrangör för att taket skall kunna motstå höga sugkrafter p g a vind. Sådan mekanisk anordning kan bestå av en självborrande plåtskruv försedd med en bricka av tillräcklig storlek för att hindra att isoleringen deformeras eller går sönder. Även andra typer av mekaniska infästningar förekommer.

Mineralull är den vanligast använda värmeisoleringen på plåttak. När man klistrar mineralull skall både plåtprofilernas toppar och isolerskivans undersida strykas med varm asfalt. Denna rekommendation har tillkommit efter det att man vid svåra stormar fått vidhäftningsbrott och avblåsning p g a bristfällig klistring. Tidigare strök man asfalt enbart på plåten. Detta fungerade bra vid läggning i inte alltför låga utetemperaturer men vid klistring i kyla sjönk asfaltens temperatur snabbt på plåten och därmed blev vidhäftningen dålig.

Den vanligaste cellplastisoleringen är polystyren. Den finns i två olika typer dels expanderad, dels extruderad. Den senare varianten har en sluten cellstruktur vilket gör materialet tätt, dvs ånggenomsläppligheten är låg. Den expanderade styrencellplasten är billigare och därmed också vanligast. Läggningsav dessa skivor är inte helt problemfri. Materialet mjuknar vid temperaturer strax under 100 °C och vid asfaltens normala arbetstemperatur ca 180 °C smälter den. Det be-

tyder att asfaltklistringen måste utföras enligt speciella metoder för att isoleringen inte skall förstöras. En metod är att med lösningsmedeltillsats i asfalten göra den användbar även vid lägre temperaturer. En annan är att stryka varm asfalt på plåten eller på tätskiktet och låta den svalna något innan den läggs mot cellplasten.

Kork som används för värmeisolering av plåttak tillverkas av naturkork som expanderas och impregneras med asfalt. Korkskivorna har relativt hög densitet och har goda hållfasthetsegenskaper vilket gör dem lämpliga som isolering på plåttak. Man kan fästa skivorna med varm asfalt. Nackdelen är att en begränsad tillgång på naturmaterial gör korkskivorna relativt dyra. För närvarande används kork i ringa omfattning.

Man har med viss framgång försökt kombinera korkens goda egenskaper med styrencellplastens låga pris i s k kombiskivor. Dessa blir lättare att lägga än styrencellplasten och billigare än korken. Ur fuktsynpunkt har kombiskivorna emellertid ungefär samma egenskaper som cellplasten varför de inte behandlas vidare här.

Följande typer av tätskikt kan förekomma.

- Papp i två eller tre lag. Ett tätskikt kan bestå av t ex
YAM + YAGv + SAM
- Folie av plast eller gummi i ett lag. Följande material kan förekomma.
Mjuk polyvinylklorid PVC + skyddsbeläggning av singel
Butylgummi IIR + skyddsbeläggning av singel
- Svetsad rostfri plåt

Dessa tätskikt används vid små lutningar eller vid helt horisontella tak. I brantare lutning kan andra material förekomma.

Papp är det vanligaste tätskiktet på plåttak även om folier av plast och gummi och täckning med rostfri svetsad plåt vunnit viss marknad. Pappen klistras direkt mot värmeisoleringen i två eller flera lager. På mineralull och på kork helklistras pappen men på cellplast brukar man punktklistra en kornbelagd papp som understa lag.

Punktklistring innebär att asfalten stryks på pappen i en omfattning av 30 - 40% av ytan. Detta kan man göra på två sätt. Antingen punktklistrar man med asfaltborsten (därav namnet) eller häller man ut en smal rand med varm asfalt i en zig-zag-linje direkt på pappen. Metoden har flera fördelar. Genom att tillföra den varma asfalten på pappen istället för på värmeisoleringen kyls den till lagom nivå innan den kommer i kontakt med cellplasten. Punktklistringen innebär vidare att det bildas en kontinuerlig luftspalt under pappen. Denna spalt skall fungera som tryckutjämnande skikt så att kondens under pappen inte orsakar blåsbildning. Man använder därför mer och mer mineralfiberbase-rad papp både till underlagspapp och till ytpapp. Vid små lutningar på taken eller vid helt horisontella tak ersätter man det mellersta lagret papp i en trelagstäckning med en asfaltmatta som ibland har ett inlägg av en metallfolie.

Pappen är uppbyggd på stomme av antingen lumppapp (YAL) eller mineralfiberfilt (YAM) som impregneras med asfalt. Dessa två typer visar väsentligt olika egenskaper. Lumppappen är lättare att lägga, den har högre rivstyrka och den är den kraftigare pappen. Mineralfiberfilten innehåller emellertid inget organiskt material och är mera beständig mot fukt än lumppappen. Om lumppappen exponeras för fritt vatten under längre tid tar den upp vatten trots impregneringen med asfalt.

Folier av plast och gummi läggs i ett skikt. Skarvarna mellan folier sinsemellan och till anslutande föremål blir därför känsliga. Varje skarv måste bli tät. Förutom priset är det framför allt skarvproblemen som gjort att papptaken lyckats behålla sin marknad trots att många andra material finns i marknaden. I ett papptak finns många skarvar men de ligger förskjutna i förhållande till varandra och säkerheten mot läckage blir större än för ett enskiktstak. Vissa folier kan man klistra med asfalt, andra läggs lösa på taket och dessa belastas med singel för att de inte skall blåsa av. Det extra singelskiktet innebär en icke försumbar lastökning. 5 cm singel ger en extra belastning av ca 1 kN/m^2 dvs samma belastning som snölasten i södra Sverige.

Tätskiktet kan också bestå av rostfri plåt. Denna har en tjocklek av 0,3 - 0,4 mm. Plåten läggs i långa band vilka fästs till varandra med svetsning (bandtäckning). Svetsfogen blir lika tät som taket i övrigt och taket kan belastas med vattentryck. Samtidigt med hopsvetsningen av plåtarna fäster man en rörlig mekanisk förankring till taktäckningen.

Förankringen är fäst i den bärande profilerade plåten med svets, popnit eller skruv. På så sätt fäster man den rostfria plåten till underlagsplåten utan användning av klistring. Det betyder att mineralullen som ligger löst mellan taktäckning och bärande plåt, endast har värmeisolerande funktion. Den måste dock kunna tåla att belastas av vertikal yttre last men behöver inte kunna ta upp suglast. Man kan därför välja en mineralullsskiva utan särskilt krav på spjälkhållfasthet för isolerade plåttak med rostfri plåttäckning.

Anslutningen mellan tak och vägg kan göras på olika sätt. Man kan lägga upp taket på väggen eller man kan dra väggen förbi taket i en krönmur, fig 2. Den senare metoden är i allmänhet att föredra. Anslutningen är lättare att tätas och man får ingen köldbrygga i den utliggande plåten. Risken med den första typen av uppläggning är bl a att plåtkanalerna blir ofrivilligt ventilerade med uteluft. Under kalla dagar kan detta innebära ytkondens på plåtens insida och risk för fuktskador. Å andra sidan kan ett visst utbyte av friskluft i plåtkanalerna även ha positiva effekter. Den kalla uteluften värms upp i kanalen och fuktinnehållet i kanalen minskar. Detta minskar också risken för fuktskador i taket.

Den undersökning som redovisas i denna rapport behandlar endast tak som är täta mot uteluft. Plåtkanalerna står inte i förbindelse med uteluften utan det luftutbyte som sker i kanalerna är mellan kanalen och inneluften. Även om anslutningen mellan tak och vägg ser ut som det första alternativet förutsätts att plåtkanalerna får en effektiv tätning så att inget luftutbyte sker.

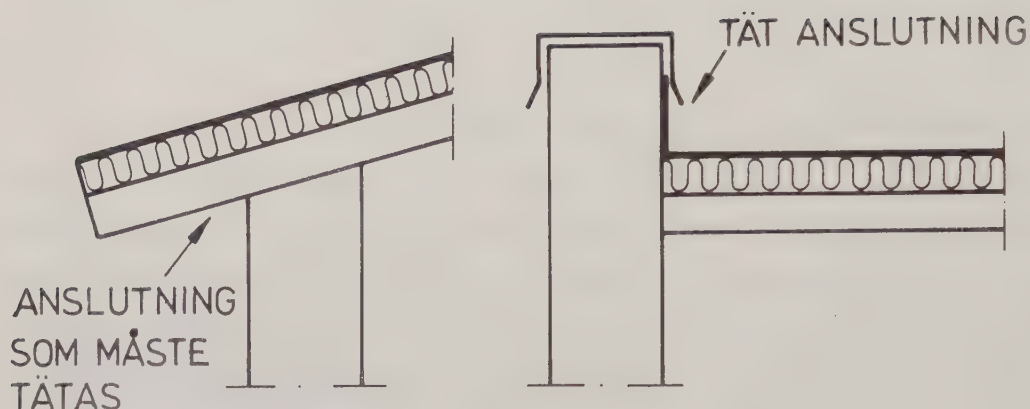


FIG 2. Anslutningar mellan tak och vägg. Olika tänkbara utförandeformer. I det vänstra alternativet är taket upplagt på ytterväggen, i det högra ansluter taket till väggen som dras upp ovanför taket.

2.1.2 Marknadsandel

Det lätta isolerade plåttaket introducerades i slutet av 50-talet och började användas i större skala under 60-talet. Plåttaket blev snabbt ett intressant alternativ för byggherrar och konstruktörer. Taket hade flera fördelar framför de dittills använda konstruktionerna. Det var ett tak som gick snabbt att montera och det var ett tak som gick lätt att anpassa till andra konstruktioner.

Det är därför inte konstigt att takets marknadsandel under 60-talet steg från praktiskt taget noll till ca 80% för tak över industribyggnader och andra större lokaler. Denna andel har under början av 70-talet varit ganska konstant. Under 1975 beräknar man att det lades ca 3 milj m^2 plåttak.

2.1.3 Taket tekniska funktion

Taket skall bära och skydda mot regn men det skall också vara värmeisolerande och klara påfrestningar av fukt utan olägenhet. Den värmeisolerande funktionen gäller såväl inläckande värme under varma perioder och då solen ger takytan en förhöjd temperatur som utläckande värme när takytan har lägre temperatur än inneluften.

De värmeisoleringsmaterial som används för plåttak och som tidigare beskrivits är alla högisolerande. Materialen har god värmeisolerande förmåga vilket betyder att man med relativt tunna materialskikt kan uppnå god värmeisolering. En nackdel med den tunna isoleringen är att fogar och skarvar mellan plattorna blir känsliga. Ett luftmellanrum i skarven mellan två isoleringsskivor innebär en köldbrygga med risk för negativa effekter såsom värmeförluster, kondens eller nedsmutsning. När erforderlig isolertjocklek växer kan man öka skivornas tjocklek, men man kan också eliminera de här nämnda negativa effekterna genom att lägga två lager isolering och förskjuta skarvarna i förhållande till varandra. Då får man inga genomgående mellanrum. Nackdelen med detta förfarande är att man får ytterligare ett arbetsmoment, nämligen klistringen av skivorna mot varandra. Detta klisterskikt innebär också en extra "fuktbroms" i taket. En sådan fuktbroms kan ha både positiva och negativa effekter. Den hindrar transporten av ånga upp i taket men den förlänger också uttorkningstiden.

Den fuktisolerande funktionen innebär att taket skall fungera utan risk för skador trots att inneklimatet är fuktigare än uteklimatet. I de flesta fall fungerar taket bra utan extra fuktskydd men om inneklimatet är extremt fuktigt brukar man lägga in en ångspärr. Denna kan bestå av en plastfolie som läggs i stora bredder och med överlapp eller av papp som klistras med överlapp direkt mot plåtens profiltoppar. När man började utföra taket använde man ångspärrar relativt sällan och ibland blev det skador i de tak som låg över fuktiga lokaler. Man fann en kritisk ånghalt av ca $10 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ vilket motsvaras av 50% vid 22 °C och föreskrev ångspärr om ånghalten översteg detta värde. Sedan denna tumregel börjat användas minskade också de rena fuktskadorna och numera är allvarliga skador i plåttak sällsynta. Regeln för fuktspärr har senare utvidgats till att gälla även för lokaler med befuktad luft och övertrycksventilerade lokaler.

Läget för närvarande är att taket fungerar väl. Skador som numera rapporteras gäller sällan fuktskyddet.

2.2 BESKRIVNING AV NÅGRA SKADETYPER

De flesta plåttak fungerar bra. Stora fuktskador är sällsynta och när de någon gång inträffar är det oftare fråga om läckage än om problem av den art som diskuteras här. Man bör hålla detta i minne vid genomgången av fuktskadorna nedan. De är inte vanliga, men de är symptom på variationer i taket som beskrivs längre fram.

Det har emellertid inträffat flera stora skadefall där man har tvingats till omfattande ändringar på taket innan de fungerat normalt. Några av dessa skador skall beskrivas närmare i följande avsnitt.

2.2.1 Dropp från taket

Konstruktionen framgår av fig 3. Taket består av profilerad plåt, 45 mm hög, 8 cm mineralull och två lag papp som ytbeklädnad. Den profilerade plåten ligger på åsar i lutning ca 5° . I taknock och i rännedal är plåtprofilerna öppna. Under det isclerade plåttaket hänger ett innertak som av akustiska skäl är isolerat med 10 cm mineralull.



Fig 3. Enplansbyggnad med plåttaket lagt i lutning. Taket är genomgående vid mellanväggsanslutningen.

Byggnaden är avdelad i två delar av en mellanvägg som ansluter till plåtprofilens undersida. Byggnaden är försedd med klimatiseringsanläggning som vintertid ger en relativ luftfuktighet av ca 50% vid 20 °C.

Redan första vintern anläggningen togs i bruk rapporterades dropp från taket. Man konstaterade dels att droppet koncentrerades till ränn dalen närmast laboratoriet dels att droppet kom i anslutning till en töperi od efter en tid av kyla. Skadan åtgärdades inte men när samma symptom visade sig under nästa vinter insåg man att taket måste lagas. Efter studium av konstruktionen och av byggnaden som sådan kom man fram till skadeorsaken.

Klimatet i laboratoriet och i kontoret är lika. Det råder ingen avsiktlig skillnad i lufttryck mellan de båda lokalerna. Inblåsnings- och evakueringsfläktarna medför emellertid små variationer i trycket och därmed får man också en liten varierande tryckskillnad mellan lokalerna. Denna skillnad har man mätt upp till 1 - 2 Pa (0,1 - 0,2 mm vp).

Tryckskillnaden mellan laboratorium och kontor utjämnas bl a genom att luften strömmar i plåtkanalerna i taket. Detta har man konstaterat med rökprov.

Man vet alltså att inneluften strömmar i plåtkanalerna. Värmeisoleringsmaterialet kommer därför i direkt kontakt med luft av hög ånghalt. Om takytan har lägre temperatur än inneluften finns det förutsättningar för ångtransport upp genom mineralullen och om pappen har tillräckligt låg temperatur kan ångan kondensera till fritt vatten eller is.

Vid besiktning av taket för kontroll av fukttillståndet i mineralullen fann man att skarvarna mellan isoleringsskivorna var onormalt breda. Man kunde mäta upp skarvar på 15 - 20 mm och de flesta hade en vidd av 10 mm. Breda skarvar var snarare regel än undantag.

Under dessa förutsättningar är det lättare att inse varför skadan fick så stor omfattning. Den fuktiga inneluften kondenserade både i mineralullen och direkt mot pappen och frös till is. Efter en tid av kondensation fylldes skarvarna med is till nollzonen. Vid ett hastigt väderomslag smälte isen i fogarna och droppade ner i plåtkanalen. Plåten låg i lutning och vattnet rann till ränn dalen där det droppade ner mot innertaket. Detta fuktades ner och när den 10 cm tjocka mineralullen i innertaket var vattenmättad droppade det ner i kontoret.

Orsaken till skadan är en serie samverkande omständigheter. Den fuktiga inneluften kan komma i kontakt med pappen i de breda skarvarna. Den kondens som bildas kan droppa ner i plåtkanalen och sedan rinna vidare ner till ränn dalen och droppa ner på undertaket.

Skadan åtgärdades genom att man dels sänkte ånghalten inomhus till 35 - 40% RF vid 20 °C dels tätade samtliga plåtprofiler för att i möjligaste mån hindra luftrörelser i taket. På så sätt ändrade man förutsättningarna för fukttransport och numera fungerar taket oklanderligt.

Taket ingår som nr 19 bland fältmättningsobjekten (se avsnitt 5). Mätningen som där beskrivs gällde klimat inomhus och utomhus i relation till klimatet i plåtkanalen. Mätningen visade att ändringen av ånghalten inomhus till lägre värde förbättrade fuktförhållandena. Detta tillsammans med tätningen av plåtkanalerna mellan laboratorium och kontor minskade fuktutbytet mellan inneluft och luft i plåtkanalen. Klimatmätningen visade att luften i taket numera var lika torr som luften inomhus. Ett fuktprov på isoleringsmaterialet visade också att detta var torrt.

2.2.2 Luftläckage genom taket. Kondens mot taktäckningen

Detta tak har en taktäckning av rostfri plåt. Värmeisoleringen är mineralull och taket har en plastfolie som ångspärr. Plastfolien ligger löst på plåtprofiltopparna och är lagd med överlapp. Taket är i vissa partier helt horisontellt och i andra lutande. Byggnaden har kontrollerat klimat +20 °C och 50% RF. Ventilationen ger övertryck i huset.

Byggnaden blev färdig på försommaren och redan samma höst började det droppa från taket. Droppet koncentrerades till de delar som låg i lutning eller till genomföringar vid t ex fläktar eller ljusschakt i den horisontella delen. Droppet koncentrerades inte till någon speciell vädertyp utan började så snart utetemperaturen blev låg.

En uppskattning av mängden dropp visade att denna var alltför stor för att vara orsakad av enbart diffusion. Plastfolien fungerar som ett gott diffusionsskydd även om skarvar och anslutningar till andra byggnadsdelar inte är helt täta. Det var även uteslutet att taket läckte eftersom droppet inte koncentrerade sig till regn. Orsaken till droppet måste alltså sökas någon annanstans.

Den rostfria plåten skarvas med en svetsfog. Denna typ blir helt vattentät och lufttät. Stora ytor på taket är hopsvetsade och är därmed helt täta. Det finns emellertid även rörliga fogar som av vattentätetsskäl placeras i anslutning till en högpunkt eller till en droppnäsa och dessa fogar är inte lufttäta.

Orsaken till det omfattande droppet från taket är därför att inneluften p g a övertrycket pressas ut i taket via skarvarna i fuktsparren. Fukten kondenserar sedan mot den kalla plåtens insida innan luften passerar ut genom den otäta rörelseskarven. Övertrycket inomhus ger en luftström inifrån och ut och eftersom inneluften innehåller mycket fukt blir mängden kondens mot tätskiktets insida avsevärd. Kondensatet kan, där taket ligger i lutning, rinna längs plåtens undersida till lägsta punkten dvs till ränndalarna. Där ansamlas vattnet inuti taket ovanpå plastfolien och rinner genom vid överlappet.

Orsaken till den stora mängden kondens är att inneluften tillåts blåsa ut genom taket. Genom att ändra tryckförhållandena kan man få en omvänd luftström som istället medför uttorkning av taket.

Även detta tak ingår i fältmättningsobjekten (nr 14 och 15 i avsnitt 5). Mätningen nr 14 visar förhållandena under den tid då man hade problem med taket. Mätningen nr 15 visar förhållandena ett år senare. Då hade man radikalt ändrat förutsättningarna för fuktvandring i taket. Ventilationen som tidigare gav övertryck i huset var ändrad till att ge ett svagt undertryck.

ett svagt undertryck. Klimatet inomhus hade ändrats från 20 °C 50% till 20 °C 40%.

Numera fungerar taket bra.

2.2.3 Läckage

Om tätskiktet av någon anledning skadas kan vatten rinna in i värmeisoleringen. Sådana otätheter i tätskikt kan ge omfattande skador men upptäcks snart åtminstone om taket saknar tät fuktspärr.

Det finns många anledningar till läckage i tätskiktet. Här skall endast nämnas några som är tänkbara.

- Bristfällig anslutning till uppstickande detaljer
- Släppor i överlapp mellan klistrade papplag
- Sönderslitning av is
- Skador i tätskiktet orsakade under byggskedet. Genomtrampning av spik o d
- Sönderslitning av tätskiktet vid anslutning till plåtdetaljer

Risken för läckage aktualiserar nackdelarna med en fuktspärr i taket. Om värmeisoleringsmaterialet stängs inne mellan två täta skikt blir läckaget svårt att upptäcka och det blir i det närmaste omöjligt att torka ut nedfuktad värmeisolering. Längre fram diskuteras lämpliga åtgärder i samband med fuktspärr för att denna risk för skador skall minska.

Som tidigare nämnts diskuteras inte särskilda problem i övrigt vad gäller läckage i tätskiktet. Här behandlas enbart fuktvariationer i taket orsakade av inifrån kommande fukt eller av byggfukt.

2.2.4 Blåsbildning i tätskikt av papp

Blåsbildning i flerlagstäckning av papp anses av många vara ett fuktproblem. Skadorna yttrar sig som en växande gasblåsa mellan de olika papplagen.

En teori till fenomenet är att vattenånga som kondenserar mot insidan av taktäckningen kan ta sig in i och genom underlagspappen. Vid kraftig solstrålning på taket och därmed åtföljande värmestegring förångas vattnet och vattenångan ger ett övertryck. Vid den höga temperaturen är asfalten och pappen mjuk och kan deformeras. Blåsan växer så länge solen förångar vattnet. När takytan kyls ner behåller pappen sin form och blåsan fortsätter växa från sitt nya läge nästa gång solen värmer ytan.

Många studier av skadade tak stöder denna teori men andra observationer visar en avvikande skadebild.

I denna rapport behandlas inte blåsbildningen i papptäckta tak som ett speciellt problem.

3 FUKTTRANSPORTMEKANISMER

Fukt kan transporteras i material i såväl ångform som vätskeform. Av betydelse för fukttransporten är fukt- och temperaturlståndet i materialet samt fuktens bindning och materialets struktur.

I ångfas kan transporten ske genom diffusion, effusion, termodiffusion och konvektion.

I vätskefas transporteras vatten genom kapillärsugning, osmos och termoosmos. I vissa fall kan yttre krafter som vind- och tyngdkraft ha betydelse.

För de material som vanligen används i det utvändigt isolerade plåttaket är följande transportmekanismer av betydelse

- diffusion
- konvektion
- kapillärsugning
- transport p g a tyngdkraft

Vid fukttransport i material samverkar ofta olika transportsätt. Detta gör det svårt att renodla ett enda fenomen. De koefficienter som bestäms är därför ofta påverkade av flera faktorer.

Taket består av flera material och transporten genom dessa är väsentligt olika. Nedan följer en beskrivning av tänkbara transportmöjligheter för fukt i taket genom takets olika delar. Här behandlas endast fukttransport orsakad av inifrån kommande fukt och inte av läckage. Fukten vandrar i överlappet mellan plåtarna upp i plåtkanalen, vidare upp genom värmeisoleringen mot den täta taktäckningen. Skarvarna mellan isolerskivor ägnas särskild uppmärksamhet. Problemet behandlas för varje konstruktionsdel för sig.

3.1 FUKTTRANSPORT GENOM DEN BÄRANDE PLÅTEN

Plåten i sig förutsättes vara helt tät. Det passerar ingen fukt genom en oskadad, hel plåtyta. Fuktutbytet sker i skarvarna mellan olika

plåtar, dels i längdskarvar dels i tvärskarvar, i håltagningar i plåten samt vid anslutningar till angränsande byggnadsdelar.

En otät fuktspärr ovanpå plåten fungerar fukttekniskt ungefär på samma sätt som den otäta plåten varför fuktspärren inte behandlas särskilt här. Först när fuktspärren klistras i varje överlapp och klistras till varje genomföring och vid varje anslutande byggnadsdel blir den så tät att den kan förhindra väsentlig fuktvandring. Transporten genom den otäta fuktspärren sker alltså på i princip samma sätt som genom den bärande plåten.

De aktuella transportsätten är

- diffusion
- konvektion
- transport p g a tyngdkraft

För att få en uppfattning av mängden transporterad fukt i de olika fallen görs några enkla uppskattningar av transporterad fuktmängd.

3.1.1 Diffusion genom överlapp

Fukttransporten p g a diffusion i luft beskrivs av ekvation (1). Ekvationen gäller för transport i stillastående luft i en dimension. Den transporterade fuktmängden g genom ett godtyckligt plan är proportionell mot ånghaltsgradienten.

$$g = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (1)$$

där

g = fuktflödestäthet $\text{kg/m}^2, \text{s}$

D = diffusionskoefficient för vattenånga i luft m^2/s

c = vattenånghalten i luften kg/m^3

Studera ångtransporten mellan två punkter 1 och 2. Vid stationära

förhållanden är g konstant längs hela transportvägen från 1 till 2. Då kan ånghaltsgradienten beskrivas med skillnaden i ånghalt mellan 1 och 2 och ekvationen (1) kan skrivas

$$g = -D \cdot \frac{c_1 - c_2}{d} \quad (1 a)$$

där

c_1 och c_2 = ånghalten i punkt 1 resp 2, kg/m^3

d = avståndet mellan punkten 1 och 2, m.

Vid ångtransport genom ett överlapp reduceras fuktflödet i proportion till ytan. För en spalt mellan två plåtar med spaltvidden b m blir fuktflödet

$$g_s = -b \cdot D \cdot \frac{c_1 - c_2}{d} \quad (1 b)$$

där

g_s = per längdmeter transporterad fuktmängd genom en b m bred spalt $\text{kg/m} \cdot \text{s}$

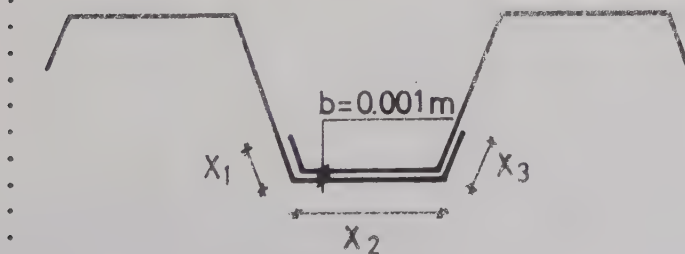
• För exempel på beräkning av transporterade fuktmängder p g a diffusion och i avsnitt 3.1.2 p g a konvektion antages följande förutsättningar gälla.

• Innetemperatur 22°C

• Utetemperatur -10°C

• Relativ luftfuktighet inne 50%

• Lufttrycksskillnad mellan inneluft och plåtkanal 1 Pa (= 0,1 mm vp)



$$X_1 + X_2 + X_3 = 0.05 \text{ m}$$

• FIG 4. Sidoöverlapp mellan två plåtar. Spalten antas ha vidden 0,001 m och djupet 0,05 m.

• Beräkningen utförs för en 1 m lång och 1 mm bred spalt enligt fig 4
 • vid konstanta förhållanden. Vid beräkningen av diffunderad fukt-
 • mängd antages transporten ske i stillastående luft. Den transpor-
 • terade fuktmängden g bestäms av ekv (1 b).

• I ekvationen ingår diffusionskoefficienten för vattenånga i luft
 • D m²/s. Denna varierar empiriskt med temperaturen enligt ekv (2).

$$D = (22,2 + 0,14t) \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

• där

• t = temperaturen i °C

• Klimatförutsättningarna i exemplet ger följande ånghalter

• ånghalt inne $c_1 = 19,41 \cdot 0,50 \cdot 10^{-3} = 9,71 \cdot 10^{-3}$ kg/m³

• mätnadsånghalt vid tätskiktet $c_2 = 2,14 \cdot 10^{-3}$ kg/m³

• Avståndet d antas lika med spaltdjupet 0,05 m.

• Vid 22 °C är $D = 25,3 \cdot 10^{-6}$

• Ekvationerna (1 b) och (2) ger transporterad fuktmängd

$$g_s = 0,001 \cdot 25,3 \cdot 10^{-6} \frac{(9,71 - 2,14) \cdot 10^{-3}}{0,05} = 3,83 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

• Om de angivna förutsättningarna antas gälla stationärt under ett dygn
 • kommer följande mängd att transporteras genom spalten.

$$g_s \cdot 3600 \cdot 24 = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m, dygn}$$

Följande laboratorieförsök visar transport p g a diffusion genom ett plåtöverlapp. Ett litet provtak byggdes upp med dimensionerna 0,6 x 0,6 m². Den bärande plåten skarvades tvärs över provet med ett ca 45 mm brett överlapp. I överlappet hölls avståndet mellan plåtarna konstant 1 mm. Ovanpå plåten låg 5 cm mineralullsisolering och papp. Klimatet var på takets undersida 25 °C, 95% och på ovansidan -10 °C.

Efter 51 dygn mättes det totala fuktinnehållet i taket. Den enda transportvägen upp i taket var genom överlappet, de övriga anslutningarna var noggrannt tätade.

Fuktmängden uppmättes till totalt 45 g i taket. Värmeisoleringens jämviktsfukthalt uppskattas till 11 g. Under mätperioden har alltså 34 g transporterats upp genom plåtöverlappet.

Med förutsättningarna i försöket fås en beräkningsmässig fuktmängd via en 0,6 m lång skarv ur ekv (1 b)

$$g_s \cdot 0,6 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 51 = 28 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

under mättiden 51 dygn. Överensstämmelsen mellan beräkning och mätning är således god.

3.1.2 Konvektion genom överlapp

En tryckskillnad mellan inneluft och luft i plåtkanalen orsakar luft-rörelser genom överlappet. Sambandet mellan tryckskillnad och luft-hastighet i överlappet vid laminärt flöde kan skrivas

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \eta \cdot d}{b^2} \cdot v \quad (3)$$

där

Δp = tryckskillnad Pa

η = luftens dynamiska viskositet Ns/m^2

d = spaltdjupet m

b = spaltvidden m

v = lufthastighet i spalten m/s

Ekvation (3) är Poiseulles lag för laminär strömning applicerad på en smal spalt.

Luftflödet Q i överlappet kan skrivas

$$Q = v \cdot A = v \cdot b \cdot l \quad (4)$$

där

Q = luftflöde m^3/s

l = spaltens längd m

$$Q = \frac{\Delta p \cdot b^3 \cdot 1}{12 \cdot \eta \cdot d} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3 \text{ a})$$

Om ånghalten på plåtens undersida är c_i kg/m^3 fås fuktflödet

$$G = c_i \cdot Q \text{ kg/s} \quad (5)$$

upp i plåtkanalen. Mättnadsånghalten vid tätskiktet är c_s . Den kondenserbara fuktmängden per tidsenhet kan skrivas

$$G_k = (c_i - c_s) \cdot Q \text{ kg/s} \quad (5 \text{ a})$$

. Beräkningsexempel:

. Under förutsättning att tryckskillnaden Δp är 1 Pa och att spalten har dimensionerna som visas i figur 4 fås den transporterade luftmängden per längdmeter spalt

$$Q = \frac{1 \cdot 0,001^3 \cdot 1}{12 \cdot 18 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05} = 9,25 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

. Skillnaden i ånghalt på ömse sidor om plåten är $7,57 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Insättning i ekv (5 a) ger

$$G = 7,0 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s}$$

. Under ett dygns stationära förhållanden fås

$$G \cdot 3600 \cdot 24 = 60,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/dygn}$$

Mängden G p g a konvektion skall jämföras med den beräknade mängden G genom en 1 m lång spalt p g a diffusion ($= 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/dygn}$). Med de här antagna förutsättningarna blir transporten p g a konvektion helt dominerande.

Några försök med lufttransport genom plåtöverlapp har utförts och redovisas nedan. I figur 5 visas luftflödet genom ett 1 m långt plåtöverlapp vid olika tryckskillnader. Kurvorna visar dels beräknade samband dels mätta samband på verkliga konstruktioner.

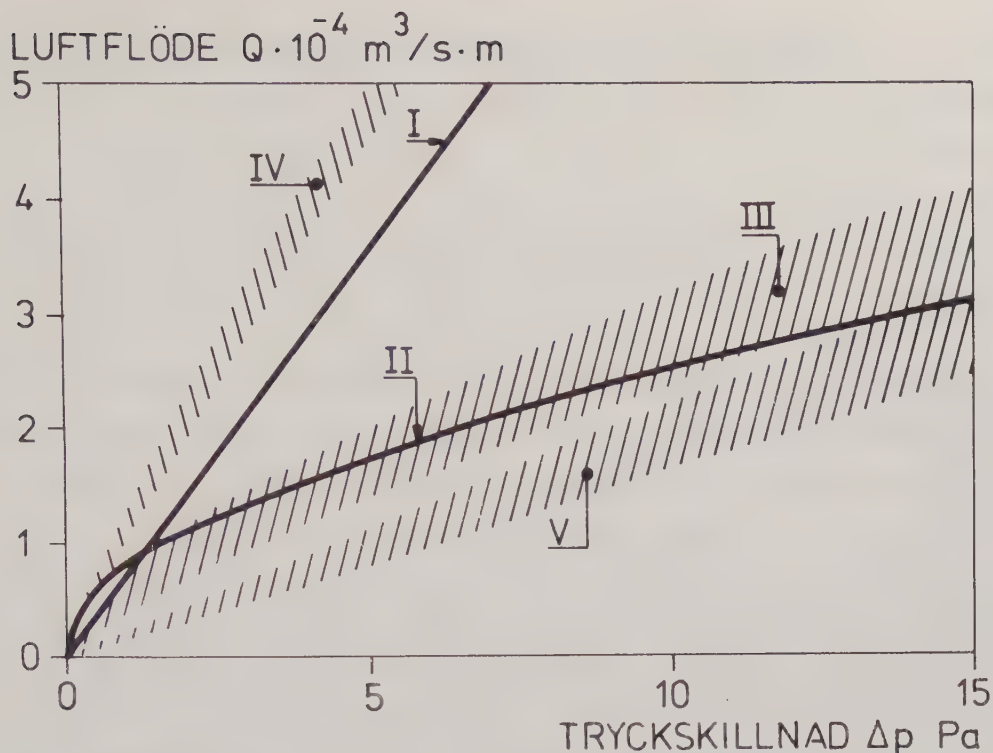


FIG 5. Sambandet mellan tryckskillnad och flöde genom ett plåtöverlapp vid olika yttre förutsättningar.

Kurva I anger beräkning enligt ekv (3 a)

Kurva II anger beräkning enligt ekv(6)

Området III anger mätvärden enligt Sarapik 1964

Området IV anger egna mätningar på 1 mm ideal skarv

Området V anger egna mätningar på verklig skarv ca 0,1 mm.

Kurvorna I och II är beräknade samband för springor av 1 resp 0,1 mm bredd. Kurva I anger sambandet vid laminärt flöde enligt ekv (3 a). Ett försök att teckna strömningen vid turbulens på ett enkelt sätt har gjorts av Dick 1950.

$$Q = \mu \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\gamma}} \quad (6)$$

där

$$Q = \text{luftflöde m}^3/\text{s}$$

$$\Delta p = \text{lufttrycksskillnad Pa}$$

$$A = \text{tvärsnittsyta m}^2$$

$$\mu = \text{reduktionsfaktor som här har satts} = 0,65$$

$$\gamma = \text{luftens volymvikt kg/m}^3$$

Ekv (6) gäller för en liten öppning i en stor plan yta. Man kan dock approximera springan med ett hål med samma yta. Ekv (6) är uppritad som kurva II.

Området III är spridningsområdet för mätningar på utförda plåtskarvar. Mätningarna har gjorts av Sarapik 1964.

Områdena IV och V anger egna mätningar på laboratorietak. Område IV anger flödet genom en längdskarv där avståndet mellan plåtarna har hållits konstant 1 mm på hela överlappets längd 70 mm. Område V visar flödet genom ett normalt utfört popnitat överlapp. Områdena III och V kan jämföras som två olika mätningar på samma utförande av överlappet. Mätningarna på normalt utförda överlapp visar god överensstämmelse med sambandet i ekv (6). Den kan alltså användas för överslagsberäkningar av luftflöde. Ekv (3) förutsätter laminär strömning och gäller vid rimliga tryckskillnader så länge överlappet är brett. Överensstämmelsen mellan mätningarna IV och kurva I visar detta. För de fall man har en definierad spalt med bredden minst 1 mm kan man för lägre tryckskillnader än ca 5 Pa räkna med ekv (3). De i denna rapport gjorda approximationerna gäller tryckskillnader som är av storleken några Pa.

3.1.3 Rinnande vatten genom överlapp

Den tredje transportmekanismen genom plåten är transport p g a tyngdkraft. Fritt vatten i plåtkanalen kan naturligtvis leta sig väg genom skarvar och överlapp och droppa ner från taket. Mängden transporterad fukt beror på skarvens eller hålets dimensioner och på eventuellt vattentryck. Luftrörelser i skarven kan också påverka flödet. I allmänhet är dock tillgången på vatten begränsad. Först vid allvarliga läckage i taket kan plåten ha någon hindrande funktion. Annars rinner vattnet genom skarvarna i den takt det kommer dit. Endast i de fall att plåtskarvarna är ordentligt tätade kan man få kvarstående vatten i stora mängder.

3.1.4 Fukttransport genom överlapp. Sammanfattning

Av ovanstående exempel framgår att fukttransporten upp i taket genom plåten bestäms av luftrörelserna i skarvarna. Räkneexemplen och mätningarna visar att även ett mycket lågt luftundertryck i taket ger fuktmängder av betydligt större storleksordning än vad som transporteras p g a diffusion. Man måste naturligtvis ta hänsyn till diffusionen som transportmekanism men om det förekommer luftrörelser är dessa helt dominerande. Förutsättningarna för luftrörelser i plåtens skarvar och hål skall nedan analyseras.

Man kan tänka sig två olika typer av lufttransport genom taket. Om taket inte är lufttätt kan det ske luftutbyte mellan ute- och inneluften. Men om taket är tätt kan ändå luftrörelser förekomma.

Skillnaden i tryck mellan ute- och inneluften orsakas av vindtryck på huset, av skillnader i densitet mellan ute och inne, s k skorstensverkan eller av mekanisk ventilation. Sådan tryckskillnad förekommer nästan alltid över en ytterkonstruktion. Den varierar både i tiden och i läget på byggnaden. Vid otätheter blir det luftläckage. Luftströmmens riktning beror självklart av om det är över- eller undertryck inomhus.

Om taket är lufttätt kan luftrörelser ändå förekomma genom plåtarnas hål och skarvar. Tryckskillnaden är normalt mycket liten. Jämför man med tryckskillnader som kan förekomma mellan ute- och inneluft blir förhållandet av storleken 1:100.

Tryckskillnad mellan inneluft och luft i plåtkanalen kan bero på följande.

- plåtkanalerna passerar genom flera avgränsade rum
- ventilationssystemet ger olika tryck i olika delar av lokalen
- otätheter i byggnaden, öppna fönster och dörrar ger olika tryck i olika delar.

Den första punkten förtjänar en kommentar. På industribyggnader, lagerhallar o d läggs taket direkt på primärbärverket och täcker hela

byggnaden. Om lokalen skall avdelas i flera rum görs detta efteråt med icke bärande mellanväggar. Sådana mellanväggar ansluter man till plåtens undersida och gör anslutningen tät där. Plåtkanalerna inne i taket kommer man inte åt och dessa förblir öppna. Om det uppstår skillnad i lufttryck i de lokaler som avgränsas av mellanväggen kan trycket utjämnas bl a via lufttransport i taket.

De här nämnda orsakerna till tryckskillnad kan i normala fall ge tryckfall av storleksordningen 1 - 3 Pa. Detta är verifierat i de mätningar som redovisas i avsnitt 5. Räkneexemplen tidigare visade att stora mängder fukt kan passera genom en otät plåtskarv även vid mycket låga tryckfall. Det är därför väsentligt att konstatera följande:

- luftövertryck inomhus ökar inte transporten av luft genom plåtens skarvar så länge takytan är lufttät. Ventilationssystemet kan emellertid ge olika tryck i olika delar av lokalen vilket kan ge luftrörelser i plåtskarvarna.
- om takytan är otät kan ett invändigt övertryck orsaka allvarliga skador p g a att inneluften läcker ut och på vägen ut genom taket kan kondensera mot kalla ytor.
- invändigt övertryck kan accepteras endast om taket är lufttätt. Sådan lufttätning kan erhållas med fullgott utförd taktäckning eventuellt kompletterad med en klistrad fuktspärr på plåtprofilernas toppar.

3.2 FUKTTRANSPORT GENOM VÄRMEISOLERINGSMATERIAL

Följande material används i praktiken som värmeisolering i det utvändigt isolerade plåttaket. Dessa fyra material ingår också i samtliga undersökningar som utförts på laboratorium och i fält.

- mineralull glasull 120 kg/m³
- mineralull stenuil 200 kg/m³
- kork 160 kg/m³
- styrencellplast 20 kg/m³

Fukttransporten genom värmeisoleringsmaterialet är den del av fuktproblemet i det isolerade plåttaket som är bäst känd. Isoleringsmaterialet som sådant undersöks mycket noga vad gäller ånggenomgångsmotstånd och luftpermeabilitet eftersom detta är egenskaper man av lång tids erfarenhet vet är av betydelse.

Förutsättningarna för fukttransport är dock inte helt klara. En diskussion om tänkbar ånghaltsfördelning vid olika förutsättningar visas i figur 6. Figuren avser det icke stationära fallet då ånghalten inne just ändrats till värdet c . Temperaturen på takets ovansida ges av uteklimatet. Ånghalten i plåtkanalen ges av inneklimatet men också av plåtens fukthindrande förmåga. Om plåten antas vara helt ångtät får man en ånghaltsfördelning som visas av figur 6 a. Figuren antyder att en sådan konstruktion skulle fungera tillfredsställande eftersom den aktuella ånghalten c hela tiden är lägre än mättnadsånghalten c_s . Detta är sant endast om värmeisoleringen hela tiden är torr. Byggfukt eller läckande vatten får inte förekomma. I praktiken är en sådan konstruktion svår att realisera eftersom taktäckningen oftast har ett avsevärt diffusionsmotstånd. Risken för skador är stor eftersom en innestängd fuktmängd inte kan torka ut även om yttre torkningsförutsättningar finns.

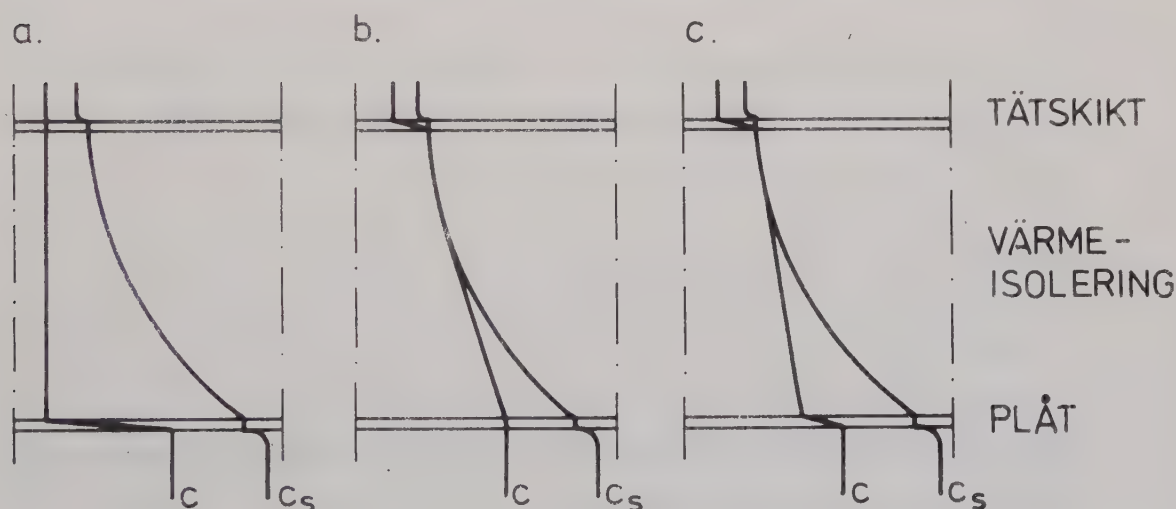


FIG 6. Ånghaltsfördelningen i värmeisoleringsmaterialet vid olika ångmotstånd i plåten. I fig a antas att plåten är oändligt diffusionsstätt, i fig b antas ingen täthet alls och i fig c antas plåten ha en viss fukthindrande förmåga.

I figuren 6 b antas plåten helt överksam som fuktspärr. Man betraktar då konstruktionen som om den bestod av enbart värmeisolering och tätskikt. Detta fall ger vid de antagna temperaturerna som gäller vinterförhållanden en beräkningsmässig risk för kondensation i taket vilket visas av att kurvorna för c och c_s sammanfaller i takets övre del. Figur 6 c visar ett mellanting mellan figur a och b. Här antas att plåten fungerar som "fuktbroms" och hindrar en del av fukttransporten. Figuren ger den riktigaste bilden av ånghaltsfördelningen i taket. Svårigheten är att bedöma graden av "fuktbroms" hos plåten.

3.2.1 Diffusion genom värmeisoleringsmaterial

Ekv (1) anger transporten av fukt i stillastående luft p g a diffusion. I ett poröst material dämpas processen och ekv (1) kan skrivas

$$g = - \frac{D}{\mu} \cdot \frac{dc}{dx} = - \delta \frac{dc}{dx} \quad (1 \text{ c})$$

där

μ = diffusionsmotståndsfaktorn

δ = materialets ånggenomsläpplighetskoefficient m^2/s

För porösa material brukar man undvika att tala om diffusionstal eftersom en del av transporten kan ske i vätskefas. Därför används termen ånggenomsläpplighetskoefficient för δ .

För ett poröst material med tjockleken d definieras ångmotståndet

$$z = \frac{d}{\delta} \text{ (s/m)}$$

Under stationära förhållanden blir g konstant genom materialet och ekv (1 c) kan omformas till

$$g = - \delta \frac{c_1 - c_2}{d} = - \frac{c_1 - c_2}{z} \quad (1 \text{ d})$$

där c_1 och c_2 är ånghalterna på ömse sidor om materialet med tjockleken d .

Ånghalten på undersidan av värmeisoleringen är beroende av ånghalten inne och av plåtens egenskaper att hindra fukttransport. Ånghalten på ovansidan värmeisoleringen är i vinterfallet normalt enbart beroende av temperaturen på tätskiktet. Detta beror på att isoleringsmaterialen är föga hygroskopiska och redan små fukthalter ger relativ ånghalt i porerna 100%, dvs $c = c_s$. Mättnadsånghalten c_s är en funktion av enbart temperaturen.

Skillnaden i ånghalt blir $c_i - c_s$ där c_i är ånghalten under värmeisoleringen och c_s ånghalten vid mättnad vid tätskiktet. Förloppet är inte konstant. Vid en ånghaltsskillnad transporteras fukt upp i taket och kondenserar mot tätskiktet. Då ändras värmeisoleringsegenskaperna för den del som påverkas av kondensutfallet och därigenom ändras temperaturen och mättnadsånghalten.

Mängden kondensat vid tätskiktet i varje tidpunkt kan beräknas med hjälp av ekv (1 d).

Om man känner klimatet på undersidan av värmeisoleringen och vet hur temperaturen på takytan varierar kan man beräkna risken för kondensation och få en uppfattning om mängden kondensat. Beräkningen förutsätter kännedom om materialets värmeledningstal. Detta varierar vid ändrad fukthalt i materialet och det måste man ta hänsyn till vid beräkningen av mängden kondens. Man skall också utföra beräkningen under tillräckligt lång tid för att kontrollera om eventuell kondens kan torka ut under varma perioder. Om så inte är fallet kommer fukten att ackumuleras i värmeisoleringen och på sikt orsaka skador.

I tabell 1 visas de olika isoleringsmaterialens värmeledningstal λ och ånggenomsläpplighetskoefficient δ . Det förra gäller för torrt och lagerfuktigt material dvs material som lagrats torrt i normalt rumsklimat före mätningen. λ -värdet har bestämts i ensidig plattapparat, beskriven av Bankvall 1970. Ånggenomsläpplighetskoefficienten δ har bestämts enligt wet-cup (dry-cup) metoden. Denna innebär att man förseglar materialet och mäter transporterad fuktmängd genom det vid kontrollerade yttre förhållanden.

Vid beräkningen av δ för materialen användes dels kaliumnitrat (=93%)

dels koncentrerad svavelsyra (ca 0%) som "saltlösning" i skålarna. I första fallet placerades skålarna i klimatrum med 33% RF och i andra fallet med ca 99% RF. På så sätt blev transporten i ena fallet riktad inifrån och ut och i andra fallet utifrån och in. Bägge provningarna gav samma resultat.

Tabell 1. Värmeledningstal och ånggenomsläpplighetskoefficienter för olika värmeisoleringsmaterial. Laboratorievärden.

	$\lambda \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$		$\delta \text{ m}^2/\text{s}$
	torrt	"lagertorrt"/vol% vatten	
mineralull			
glasull 120 kg/m ³	0,034	0,034/0,05	$110 \cdot 10^{-7}$
mineralull			
stenull 200 kg/m ³	0,037	0,037/0,05	$120 \cdot 10^{-7}$
kork			
160 kg/m ³	0,043	0,044/0,2	$11 \cdot 10^{-7}$
styrencellplast			
20 kg/m ³	0,035	0,035/0,01	$6 \cdot 10^{-7}$

En uppfattning av mängden kondenserad fukt i olika material fås av följande beräkning. Antag att klimatet i plåtkanalen är konstant och 20 °C och 50% RF. Då finns det beräkningsmässig risk för kondensation vid tätskiktet om temperaturen där är lägre än 8,7 °C. Mängden kondensat g bestäms av värmeisoleringsens fuktegenskaper och av ånghaltsskillnaden. Fig 7 visar den enligt ekv (1 d) beräknade mängden kondensat vid tätskiktet vid olika medeltemperaturer ute och tak isolerade med olika material. Tätskiktet förutsättes vara helt ångtätt. Vidare antas att temperaturen på ytan är lika med utetemperaturen.

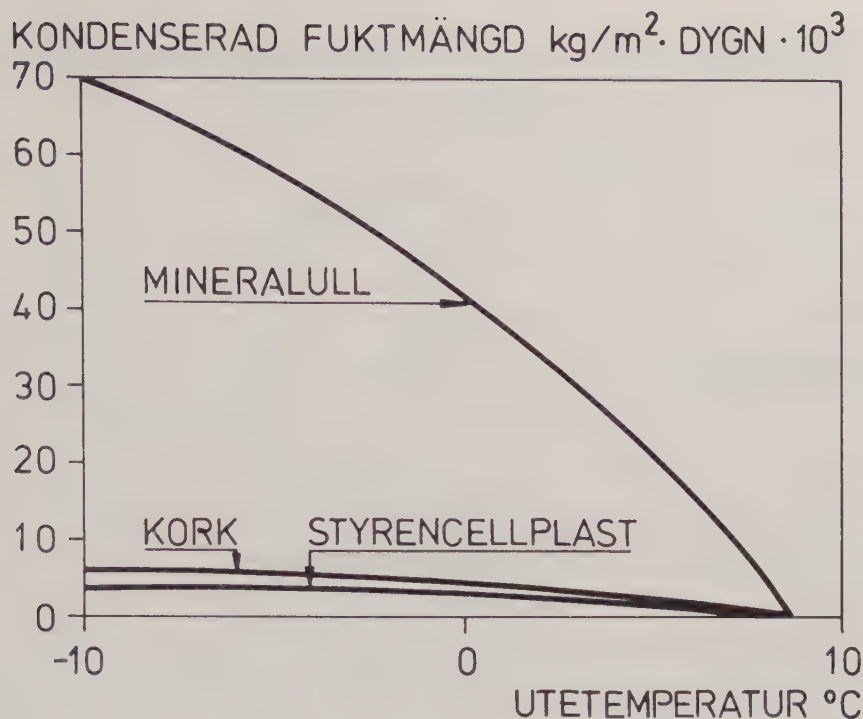


FIG 7. Kondenserad fuktmängd vid tätskiktet ovanför en 10 cm tjock värmeisolering om klimatet på varma sidan är 20 °C 50% RF och tätskiktets temperatur är utetemperaturen. Beräkningen avser förhållanden vid kondensationens början.

För fig 7 gäller att inneluftens klimat är konstant vid varierande uteklimat. För de flesta lokaler är så inte fallet. Inneluftens fukt-tillstånd beror av uteluftens. Därför blir fuktberäkningen inte så enkel och så allmän som i fig 7. Fig 8 är ett försök att beskriva beräknad kondensmängd om inneklimatet varierar. I figuren antas ånghalten inne c_i variera med ånghalten ute c_u enligt

$$c_i = c_u + 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

Antagandet är rimligt för en bostad eller ett kontor.

I figuren visas även effekten av en temperatursänkning på tätskiktet. Risker för kondensation ökar då liksom mängden kondensat. Beräkningen är gjord för 10 cm mineralull.

Uteluften har antagits ha olika relativ ånghalt beroende på temperaturen. Relationen mellan temperatur och relativ ånghalt har bestämts med hänsyn till klimatets medelvariation i Sverige.

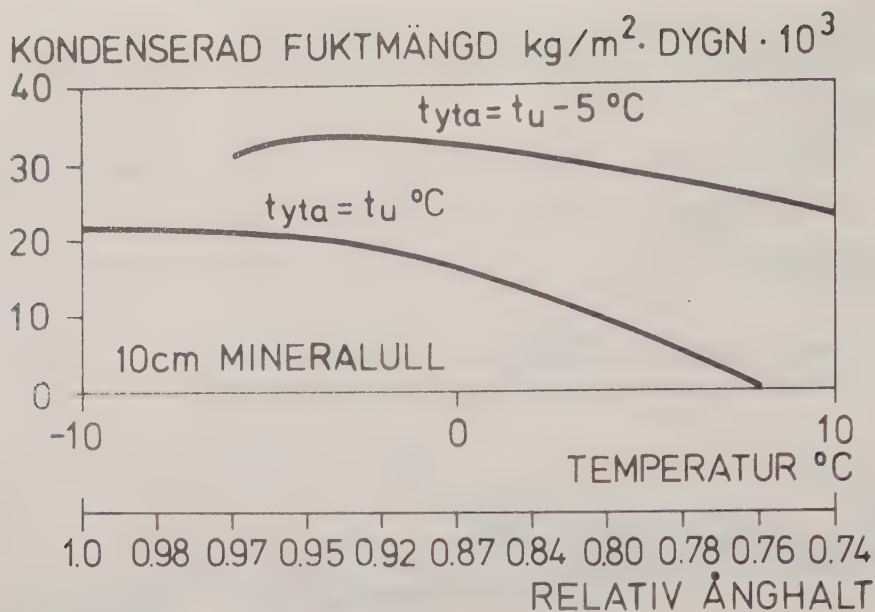


FIG 8. Kondenserad fuktmängd vid tätskiktet ovanför en 10 cm tjock mineralullsisolering om ånghalten inne är $c_i = c_u + 2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

Temperaturen på tätskiktet t_{yta} antas dels lika med t_u dels 5° lägre än t_u .

De två figurerna 7 och 8 anger kondenserad fuktmängd vid konstant temperatur. I normala fall varierar temperaturerna utomhus och på tätskiktet kraftigt under dagen. I nedanstående exempel visas fuktvariationen i ett tak av 6 cm kork. Materialet visar en större fukttröghet än t ex mineralull. Isoleringsmaterialen är mer eller mindre hygroskopiska. Inom det hygroskopiska området binder kork avsevärt mer fukt än t ex mineralull. Därför blir fukttransporten i kork avsevärt långsammare än i mineralull.

- Följande exempel gäller för ett tak ovanpå en byggnad med ett konstant klimat av 22°C 50% RF dvs med ånghalten $9,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.
- Takets yttersida kyls av nattluften och av långvågig utstrålning men värms av solstrålning på dagen. Ytans temperatur kan under ett marsdygn antas följa temperaturen enligt kurvan i figur 9. Det förutsättes att ytan är snöfri. Temperaturförloppet upprepas varje dygn.

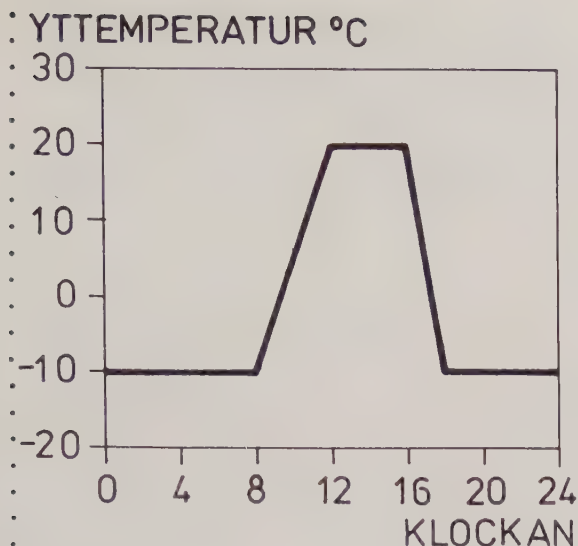


FIG 9. Antagen ytemperaturvariation vid beräkning av fuktfördelning i värmeisolering.

Med takytans temperatur ändras också mättnadsånghalten och ånghaltspotentialen. I beräkningen förutsätts dock att temperaturen momentant ställer in sig till en rätlinjig fördelning vilket inte är helt riktigt. Materialen är emellertid lätta och vid de tjocklekar som beräkningen avser blir felet litet.

För ett litet element inne i materialet kan man, under förutsättning att den enda transportmekanismen är endimensionell diffusion, skriva

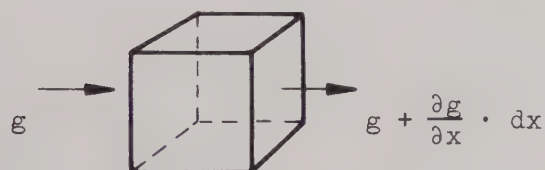


FIG 10. Endimensionell fukttransport p g a diffusion.

$$(g - (g + \frac{\partial g}{\partial x} \cdot dx)) d\tau \cdot dy \cdot dz = \frac{\partial w}{\partial \tau} \cdot d\tau \cdot dx dy dz \quad (7)$$

vilket förenklas till

$$-\frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial \tau} \quad (7a)$$

där

w = fukthalt i materialet kg/m^3

τ = tid s

Genom derivering av ekv (1 c) fås

$$\frac{dg}{dx} = -\delta \frac{dc^2}{dx^2} \quad (8)$$

• Här antas att δ är konstant och oberoende av materialets fukthalt.

• Ekv (7 a) och (8) ger

•
$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \delta \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{9}$$

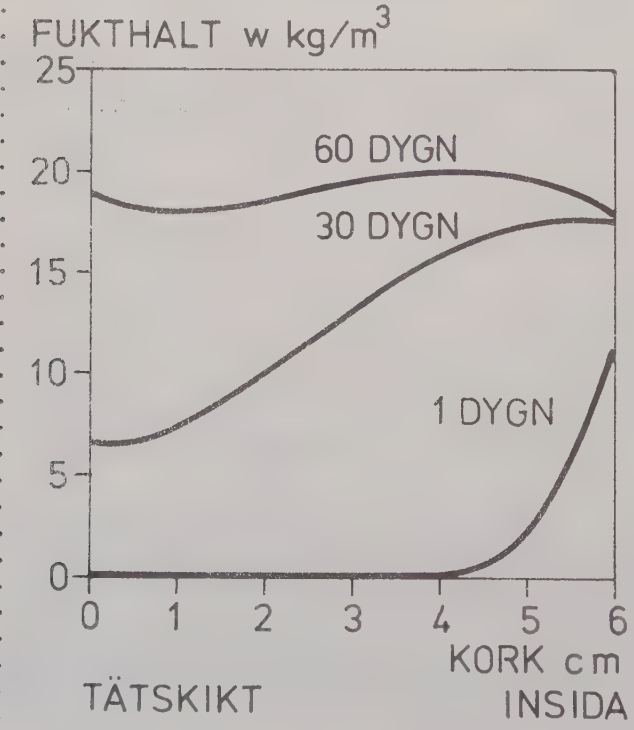
• eller i differenser

•
$$\frac{\Delta w}{\Delta \tau} = \delta \frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2} \tag{10}$$

• där uttrycket $\frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2}$ kan approximeras

•
$$\left(\frac{\Delta^2 c}{\Delta x^2}\right)_a = \frac{c_{a+1} - 2c_a + c_{a-1}}{\Delta x^2} \tag{11}$$

• Beräkningen har utförts på dator. Resultatet återges i figur 11. Taket kommer inte att torka ut under någon del av den undersökta perioden eftersom medeltemperaturen vid ytan antas vara så låg som $-1,25^\circ\text{C}$ och därför ökar fukthalten under hela beräkningen.



• FIG 11. Fukthaltsfördelning efter olika tid i en från början torr takskiva av 6 cm kork som utsätts för inneklimatet 22°C 55% RF och upprepad dygnsvariation av utomhusklimatet enligt figur 9. Beräknade värden.

- Beräkningen för mineralull visas i figur 12. Här har av stabilitets-
 • skäl antagits en gles skiktindelning och därför får fukthaltsskurvan
 • ett något diskontinuerligt utseende. Skillnaden mot förhållandena i
 • korkisoleringen är markant. Fuktinnehållet vid tätskiktet ökar hela
 • tiden och ökar snabbt. Fuktinnehållet i det inte nedfuktade området
 • är lågt eftersom jämviktsfukthalten vid dessa relativa ånghalter är
 • låg.

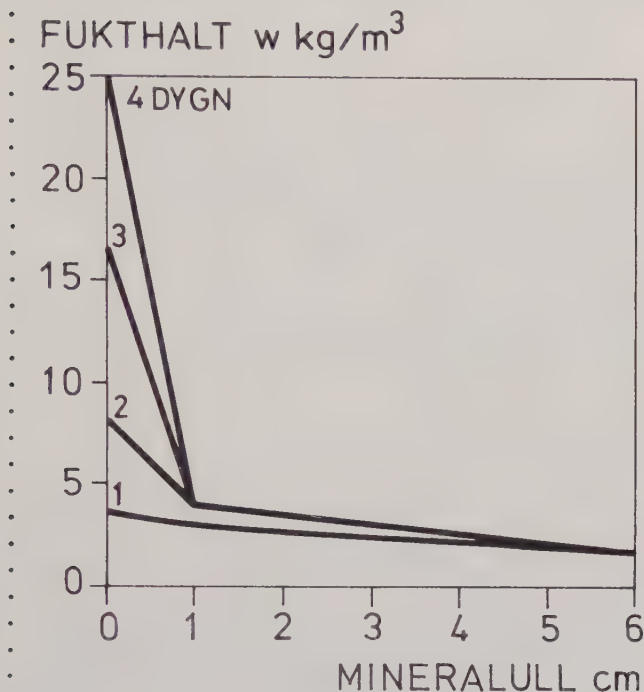


FIG 12. Fukthaltss fördelning efter olika tid i en vid provstart torr takskiva av 6 cm mineralull som utsätts för inneklimate 22 °C 50% RF och upprepade dygnsvariation av uteklimate enligt figur 9. Beräknade värden.

3.2.2 Konvektion genom värmeisoleringsmaterial

Förutsättningen för konvektion genom materialet är en lufttrycksskillnad. För materialet i taket finns det två tänkbara transportvägar för luft, dels vinkelrätt mot isoleringsskivorna, dels parallellt med dem.

Den första transportvägen förutsätter en tryckskillnad mellan luften i plåtkanalerna och luften vid tätskiktet. Normalt förekommer inga sådana tryckskillnader. Förutsättningarna ändras dock om tätskiktet är punkterat och otätt. Nedan visas hur en tryckskillnad över värmeisoleringen orsakar ett volymflöde genom dels materialet och dels skarvarna.

Den andra transportvägen förutsätter tryckskillnad i takplanet. Om en sådan tryckskillnad uppträder parallellt med plåtkanalerna som visas i figur 13 blir transporten i värmeisoleringen obetydlig i förhållande till transporten i plåtkanalerna. En tryckskillnad vinkelrätt mot plåtkanalerna kan dock ge luftrörelser i värmeisoleringen. För de material som används på plåttak blir volymflödena dock små.

- Förhållandet mellan flödet genom värmeisoleringen och flödet längs plåtkanalerna är av storleksordningen 10^{-6} . Detta gäller för det mest genomsläppliga värmeisoleringsmaterialet glasull 120 kg/m^3 . För övriga material blir samma förhållande ännu mindre.

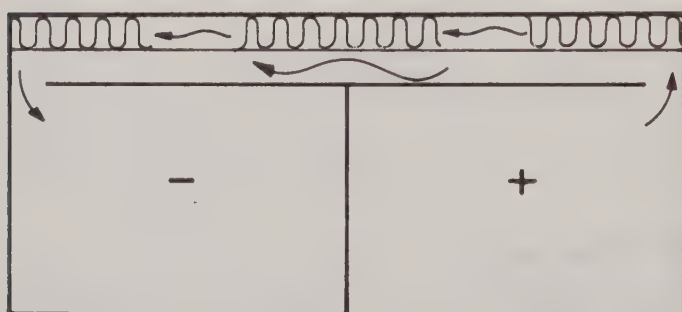


FIG 13. Schematisk bild av luftrörelser i plåttak parallellt med plåtkanalerna. Luftrörelserna kan ge upphov till konvektion i värmeisoleringen.

Transporten i de porösa materialen beskrivs av permeabiliteten.

Darcy's lag gäller för laminärt flöde genom poröst material. Ekv (12) anger att strömningshastigheten är proportionell mot tryckgradienten.

$$v = - \frac{Bo}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (12)$$

där

v = lufthastigheten m/s

p = lufttrycket Pa

η = dynamiska viskositeten Ns/m^2

Bo = materialets specifika permeabilitet m^2

Höglund 1963 har bestämt luftgenomsläpplighet för några porösa värmeisoleringsmaterial. Hans arbete visar att lufterörelser för normala förhållanden i värmeisoleringen är försumbara.

- Höglunds mätningar visar t ex att en lufttryckskillnad av 1 Pa över en 5 cm tjock värmeisolerings-skiva (fall 1) ger följande volymflöden genom 1 m² av ytan.

• styrencellplast	15 kg/m ³		
• kork	140 kg/m ³	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
• mineralull	45 kg/m ³	$21 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

- Observera att mineralullen här har betydligt lägre volymvikt än den som används på tak. Flödena skall jämföras med dem som i fall 1 kan uppträda i skarvarna mellan värmeisolerings-skivorna. Antag att springan i skarvarna i genomsnitt är 2 mm breda. Ur ekvation (3 a) kan volymflödet genom skarvarna beräknas. Detta blir med antagandet att värmeisolerings-skivorna har en yta av 0,5 m², $23 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, dvs av samma storleksordning som volymflödet genom den lätta mineralullen 45 kg/m³.

- För att få en uppfattning om luftflödet genom mineralullsskivor av annan densitet har Höglund 1963 sammanställt mätningar vid olika densiteter och angivit regressionslinjer för olika material. Bankvall 1971 har gjort liknande mätningar på glasull och stenull. I figur 14 visas dessa linjer för dels stenull, dels glasull vinkelrätt mot skivan och parallellt med skivan. Med hjälp av sådana kurvor uppskattas permeabiliteten för luft i de material som används på plåttaket. Sedan beräknas volymflödena per m² enligt exemplet ovan.

• stenull 200 kg/m ³	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$
• glasull 120 kg/m ³	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$

- Jämfört med flödet i skarvarna blir flödet genom materialet ungefär 1/20.

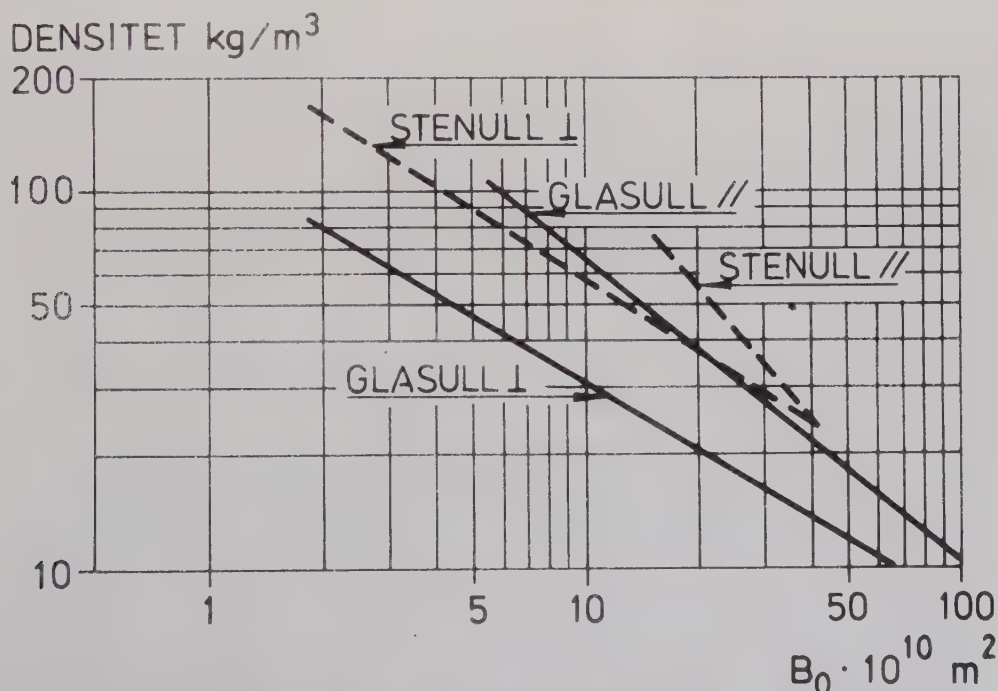


FIG 14. Specifik permeabilitet för mineralullsmaterial av olika volymvikt. Efter Bankvall 1971.

Förutsättningarna för luftrörelser i värmeisoleringen är under normala förhållanden små.

Pumpverkan

En annan typ av luftrörelser är den som orsakas av "pumpverkan". Luftens volym är direkt proportionell mot absoluta temperaturen och omvänt proportionell mot lufttrycket enligt allmänna gaslagen.

$$p = \frac{1}{M} \cdot \frac{R \cdot T}{V} \quad (13)$$

där

p = lufttryck

V = volym

M = molekylvikt

R = allmänna gaskonstanten

T = absolut temperatur

En bestämd luftmängd ändrar volym om temperaturen eller trycket ändras. "Pumpverkan" kan tänkas fungera på följande sätt. Taket skall vara försett med tät ångspärr och tät ovansida. Värmeisoleringen skall vara permeabel för luft. Luften i värmeisoleringen skall någonstans stå i förbindelse med uteluften. Om temperaturen ändras i taket ändras trycket och luften pumpas ut eller in.

Storleken av luftrörelserna p g a "pumpverkan" skall beräknas. Antag att temperaturen på tätskiktet ändras. Antag vidare att lufttrycket är konstant under hela temperaturändringen.

Förutsättningen att trycket är konstant ger följande samband ur ekv (13)

$$V = \text{konst} \cdot T$$

Förhållandet vid tiden τ jämfört med tiden $\tau = 0$ kan skrivas

$$\frac{V_\tau}{V_0} = \frac{T_\tau}{T_0}$$

Volymändringen blir

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{T_\tau}{T_0} - 1 \right)$$

där

T_τ = medeltemperatur K i utrymmet mellan ångspärr och tätskikt vid tiden τ

T_0 = medeltemperatur K i samma volym vid $\tau = 0$

Följande tabell anger volymändringen ΔV vid olika medeltemperaturer T i taket om $T_0 = 293 \text{ K}$ ($=20^\circ \text{C}$).

TABELL 2. Volymändringen ΔV i taket vid medeltemperatur t .
Vid $t = 20^\circ \text{C}$ är $V = V_0$

$t \text{ } ^\circ \text{C}$	ΔV
0	$- 0,068 \cdot V_0$
10	$- 0,034 \cdot V_0$
20	0
30	$0,034 \cdot V_0$
40	$0,068 \cdot V_0$
50	$0,102 \cdot V_0$

- Följande exempel visar vilken storleksordning lufttrörelserna har som orsakas av "pumpverkan". För att ta hänsyn till pumpverkans fulla effekt krävs kännedom om tätskiktets extrema temperaturer dels nattetid vid kraftig utstrålning dels dagtid vid kraftig instrålning.
- Konstruktionen består av profilerad plåt, ångspärr klistrad mot plåten, 10 cm mineralull och överst papptäckning. Taket har en luftningshuv per 200 m^2 yta.
- Antag att luftmängden i mineralullen är ca 80% av totala volymen. För mineralull gäller att ca 8% är fast material. Resten antas vara asfalt dels i materialets yta dels i klisterfogarna. Total luftmängd i taket blir då $0,8 \cdot 0,1 \cdot 200 = 16 \text{ m}^3$.

. Antag att taket nattetid har en yttemperatur av ± 0 som under dagtid
 . p g a solstrålning höjs till $+60^{\circ}\text{C}$. Medeltemperaturen i värmeisoler-
 . leringen ändras då från 10°C till 40°C om innetemperaturen antas
 . vara 20°C .

. Skillnaden i volym mellan dessa medeltemperaturer blir
 . $\Delta V = 0,102 \cdot V_0 = 1,63 \text{ m}^3$

. Volymändringen kan bidra till uttorkning av taket. Antag att luft-
 . mängden som lämnar taket i medeltal har temperaturen $+30^{\circ}\text{C}$ och
 . relativa ånghalten 50%. Antag vidare att den tillförda luften har
 . temperaturen $+15^{\circ}\text{C}$ och 40%. Det betyder i så fall en möjlig bort-
 . transport av fukt av totalt

$$g = \Delta V \cdot (c_i - c_u) = 1,63(16 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}) = 20 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

. Om man vidare antar att pumpverkan av det här slaget kan upprepas
 . varannan dag betyder det att mängden

$$20 \cdot 10^{-3} \cdot 15 = 300 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

. kan transporteras bort per månad. Utslaget per m^2 yta blir en bort-
 . transporterad fuktmängd, en uttorkning, av $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mån, m}^2$.

Exemplet visar att ett luftutbyte äger rum. Den fukttekniska fördelen av "pumpverkan" är dock begränsad. För vattentillförsel orsakad av brott i ångspärr eller läckage genom tätskiktet saknar denna fuktbortföringsmekanism betydelse. Den kan eventuellt vara tillräcklig för att förhindra skador orsakade av byggfukt eller genom ångspärren diffunderande fukt.

Det bör observeras att en "luftning" av värmeisoleringsmaterialet av denna typ inte är helt riskfri. Tätskiktet är genombrutet och därmed kan takets lufttätning äventyras. Fuktspärren måste vara lufttät och hindra lufttransport genom taket. Om så inte är fallet kan en lufttrycksdifferens över taket orsaka luftrörelser, konvektion, inifrån och ut. Då är risken stor för ytkondensation mot tätskiktets insida.

Fuktkonvektion av detta senare slag kan orsaka allvarliga fuktskador. Den fuktiga inneluften passerar utmed det kalla tätskiktet och fukten kan kondensera i materialet innan luften når huven. Om denna konstruktion används måste man därför försäkra sig om att förutsättningarna för fuktkonvektion saknas dvs antingen att fuktspärren är helt lufttät eller att lokalen är försedd med undertrycksventilation så att luftströmmen genom taket blir riktad utifrån och in. Då löper man inte risken att få kondensation.

"Pumpverkan" som mekanism kan orsaka luft rörelser även mellan taket och inneluften om samma förutsättningar som tidigare gäller. Då skall ångspärren vara genombruten och tillåta luftutbyte. Flödet är dock inte av samma storleksordning som flödet p g a tryckskillnader över plåten.

3.2.3 Övriga transportmekanismer i värmeisoleringsmaterialet

Övriga transportmekanismer av betydelse i värmeisoleringsmaterialen som används i plåttaket är kapillärsugning och transport p g a tyngdkraft.

Av erfarenhet vet man att materialen har liten kapillärsugning och snarast är vattenavvisande. Det betyder att man för praktiska förhållanden kan bortse från kapillärsugning som transportmekanism. Detta förenklar beräkningarna av fuktförloppet.

Fritt vatten kan förekomma vid läckage i tätskiktet eller vid kondensation i takets övre del. Vattnet kan transporteras vidare antingen p g a transport i ångfas eller p g a tyngdkraften.

Försöken som beskrivs i följande avsnitt 3.2.4 avser även vattenkvarhållningsförmågan i materialen och transporten av vatten från övre delen av värmeisoleringen ut genom nederytan. Försöken visar att samtliga värmeisoleringsmaterial kan hålla stora mängder vatten utan att det droppar från undersidan. Således är även transporten p g a tyngdkraft av underordnad betydelse.

3.2.4 Försök med kondensation i värmeisoleringsmaterial

I det följande beskrivs laboratorieförsök som gäller värmeisoleringsmaterialet. Det först beskrivna försöket visar hur kondensmängden ökar i materialet vid kontinuerlig ånghaltsskillnad mellan värmeisoleringens undersida och tätskiktet. Det andra försöket visar hur värmeisoleringen försämras vid ökad mängd kondensat. Vidare redovisas försök med värmeinflödesmätningar under kondensation. Slutligen redo-

görs för risken för ytkondensation på takets undersida och risken för ytkondensation mitt för mekaniska infästningsdon.

Fuktackumulation i värmeisoleringsmaterial

Provet har utförts som ett kondensationsförsök under lång tid. Följande fyra värmeisoleringsmaterial med en tjocklek av 5 cm har blivit utsatta för en konstant ånghaltsdifferens av $7,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$:

stenull	200 kg/m^3
glasull	120 kg/m^3
kork	160 kg/m^3
polystyren	20 kg/m^3

Värmeisoleringens ovansida har täckts med asfaltmatta, undersidan exponerades mot inneklimatet direkt. På grund av ånghaltsskillnaden vandrar fukt upp i materialet och kondenserar mot täskiktet. Kondensationszonen har temperaturer under noll och kondensatet fryser till is.

Ur varje värmeisoleringsmaterial har skurits ut tre provytor $0,15 \times 0,15 \text{ m}^2$ som under försökets gång flera gånger togs ut och vägdes. Därefter placerades de åter i taket. Viktökningen noterades för hela provet. Någon analys av kondensationszonen har inte gjorts i detta försök. Fuktmängden anges istället per ytenhet. Kondensationstiden var 60 dygn. Därefter torkades "taket" ut. Uttorkningen gick till så att temperaturen på kalla sidan höjdes till samma nivå som på varma sidan. Under några timmar på dagen, från kl 8 till kl 16 fick takytan tillskottsvärme från värmestrålare som efterliknade solstrålningen på ett vanligt tak. Temperaturen steg då på ytan från 22 till ca 40°C .

Resultatet från mätningen visas i fig 15 nedan. Första delen av figuren visar hur mängden fukt ökar kontinuerligt. Den andra delen visar hur fukten vandrar tillbaka från värmeisoleringen när takytan värms upp. Kurvorna är var och en medelvärden från 3 prov.

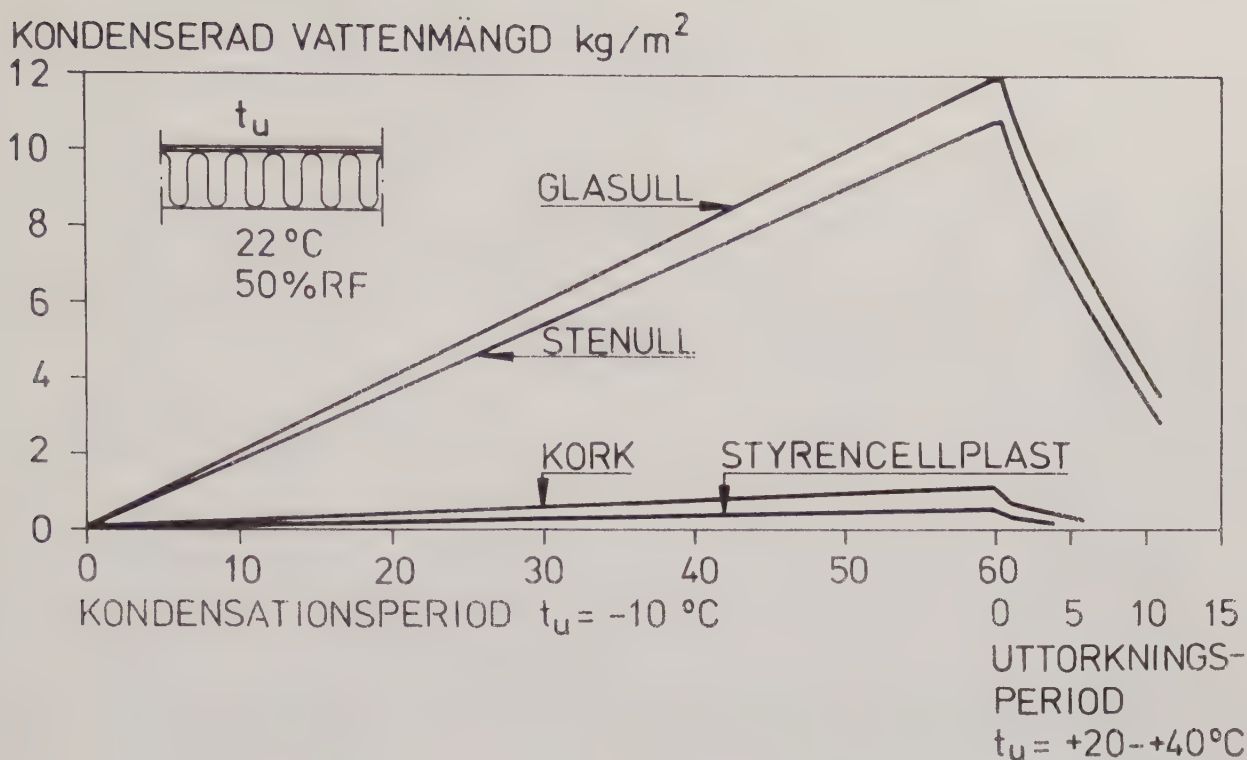


FIG 15. Uppfuktning och uttorkning av 5 cm tjocka skivor av värmeisoleringsmaterial i takkonstruktion vid kontrollerade yttre förhållanden.

Under kondensationen följer viktökningen ett nära rätlinjigt förlopp. I mineralullsskivorna ökar vatteninnehållet till $10 - 12 \text{ kg/m}^2$, i kork och polystyren till $0,5 - 1,0 \text{ kg/m}^2$. Under uttorkningen minskar vattenmängden snabbt.

Under uttorkningsskedet visar kork och cellplast en snabb återtransport av fukten. Detta är en intressant iakttagelse eftersom man har ansett att cellplast kan fungera som "fuktkälla" i dessa typer av tak. Den i cellplast kondenserade fukten kan inte återtransporteras kapillärt och man har trott att fukten ackumuleras mellan olika kondensationstillfällen. Diffusion kan dock ge en relativt snabb uttorkning vilket detta försök visar.

Uttorkningen av mineralullsisoleringarna visar en liten platå under

den första dagen. Det är den tid det tar att fullständigt smälta ner det ca 2 cm tjocka porösa isskiktet. Efter denna tid avgår fukten från isoleringens undersida. En viktig iakttagelse är att det under uttorkningen inte i något fall observerades fritt vatten på undersidan av isoleringen och alltså heller inget dropp. Även i de porösa mineralullsisoleringarna sker alltså återtransporten som diffusion.

Värmeisoleringsförsämring vid kondensation

I detta avsnitt beskrives mätningar av värmegenomgången i tak utsatta för kondensation. Mätningarna är en fortsättning av försöken med kondensation i värmeisoleringen. Samtidigt som ytemperaturerna hålls konstanta mätes värmeflödet genom konstruktionen. Efterhand som mängden kondensat i taket ökar, ökar också värmeflödet.

Provet har utförts på följande sätt. "Taket" har bestått av enbart 5 cm värmeisolering och tätskikt. Ovansidan har exponerats för en temperatur av -10°C och undersidan för temperaturen $+20^{\circ}\text{C}$, 50% RF. Av mättekniska skäl har tätskiktet vindskyddats och värmeisolerats med en 2 cm tjock byggmatta. Med detta arrangemang ändras ytemperaturen på tätskiktet så att det blir något varmare än uteluften. Mätpunkternas läge visas i figuren 16 nedan. Termoelementen har på takets undersida monterats i luften ca 2 cm från ytan och på ovansidan direkt mot tätskiktet. Värmeflödesmätarna har monterats in i tätskiktet för att mätarens egen utformning inte skall påverka resultatet. Värmeflödesmätarna måste vidare ligga på takets ovansida för att inte hindra diffusionen.

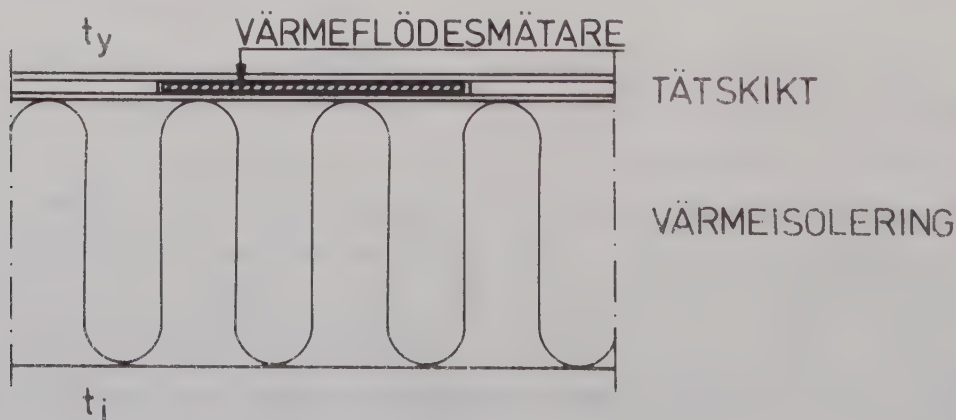


FIG 16. Provtakets utseende vid bestämning av värme- och fuktgenomgången med mängden kondensat.

Det mätta "k-värdet" i taket avser värmeöverföringen från inneluft till takets ovansida, dvs i värmemotståndet för taket innefattas övergångsmotståndet vid innerytan. I fortsättningen benämnes detta mätta "k-värde" för k' .

Provet har utförts i två omgångar. Vid den första mätningen gjordes få utvärderingar av värmegenomgången. Mätningen registrerades då på punktskrivare. Vid den andra mätningen gjordes tätare utvärdering och resultaten lagrades på datalog. Mätvärdena bearbetades därefter på dator.

Resultatet av första mätningen visas i figur 17. De båda mineralulls-isoleringarna visar samma ökning av k' -värdet men med kurvorna förskjutna i förhållande till varandra. Kork och cellplast å andra sidan varierar mindre. En enkel beräkning av värmeisoleringsförsämringen ger kurvorna I och II där I gäller för mineralullsisolering och II för kork. I beräkningen antas att kondensmängden byggs upp kontinuerligt under kondensationsperioden. Kondensatet har ett värmeledningstal som sätts lika med isens, det övriga materialet antas torrt. När andelen kondensat ökar, minskar andelen torrt material och värmegenomgången ökar på sätt som beskrivs av kurvorna I och II.

Kurvorna har utseendet

$$\frac{1}{k'} = m_i + \frac{d_1}{\lambda} + \frac{d_2}{\lambda_{is}}$$

där

m_i = övergångsmotståndet inne m^2K/W

d_1 = tjockleken av det torra materialet m

d_2 = tjockleken av isskiktet m

λ = det torra materialets värmeledningstal $W/m K$

λ_{is} = isens värmeledningstal $W/m K$

Som värde på λ_{is} har ansatts 0,56 $W/m K$ vilket gäller för is med en densitet av ca 500 kg/m^3 . För högre densiteter ökar λ_{is} till ca 2 $W/m K$. För vatten är $\lambda = 0,56$.

När istjockleken ökar, minskar värdet på d_1/λ och k' -värdet ökar.

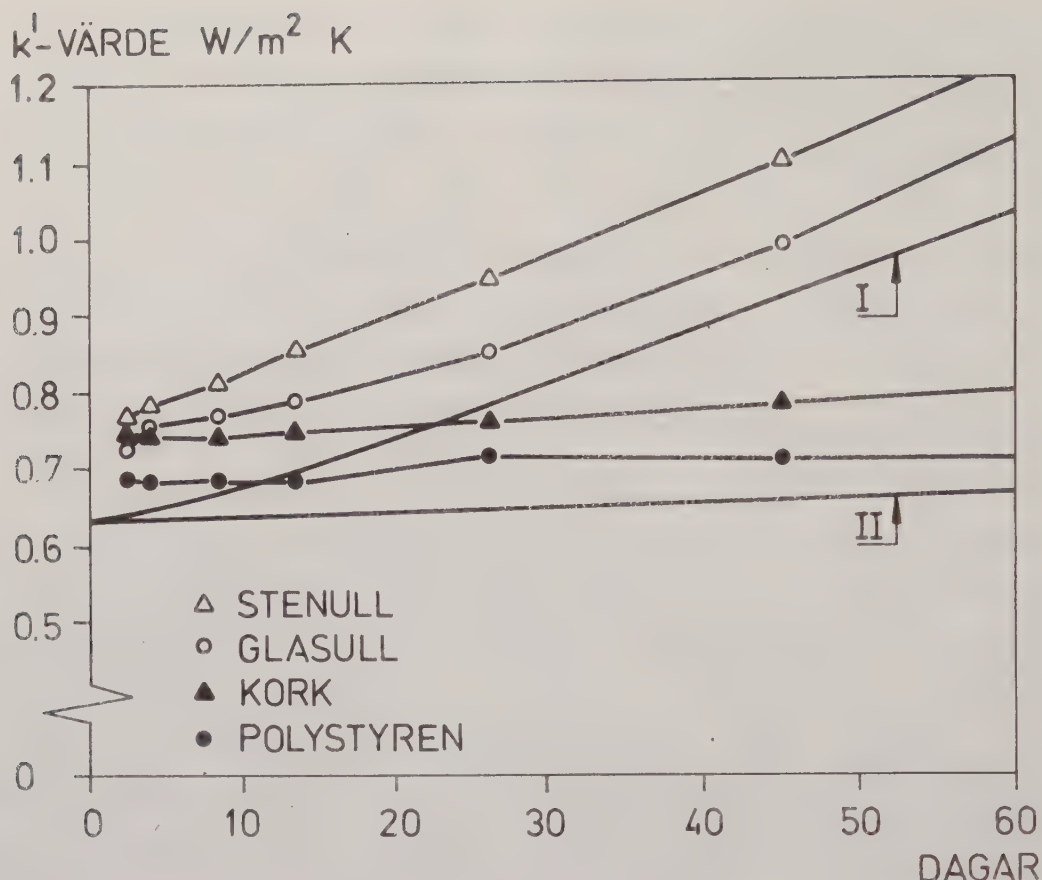


FIG 17. Värmeffödets variation under kondensation i tak med olika värmeisolering. Mätvärden från första mätserien. Helt dragna kurvor visar en i texten beskriven beräknad isoleringsförsämring.

De mätta isoleringsförsämringarna följer i stort de beräknade. Emellertid ligger de mätta kurvorna konstant över de beräknade. En förklaring kan vara att mätmetoden ger missvisande resultat. Värmeffödet som mäts i taktäckningen just ovanför kondenszonen kan påverkas av det vid kondensationen frigjorda värmnet.

Vid den andra provserien lades därför stor vikt vid att undersöka vad som händer vid provstart. Noggrannheten vid registreringen var bättre vid detta försök än det tidigare. Resultatet av mätningen presenteras material för material i figurerna 18 - 21. I figurerna anges dels samtliga mätpunkter, dels en med minsta kvadratmetoden anpassad kurva. Vid tiden $\tau = 0$ anges beräknat k -värde för taket med λ -värden enligt tabell 1 i avsnitt 3.2.1. Detta beräknade värde för $\tau = 0$ är avsevärt lägre än värdet för skärningen av mätvärdeskurvan med linjen för $\tau = 0$. Skillnaden är 28 - 30% för mineralull, ca 18% för polystyren och 7% för kork.

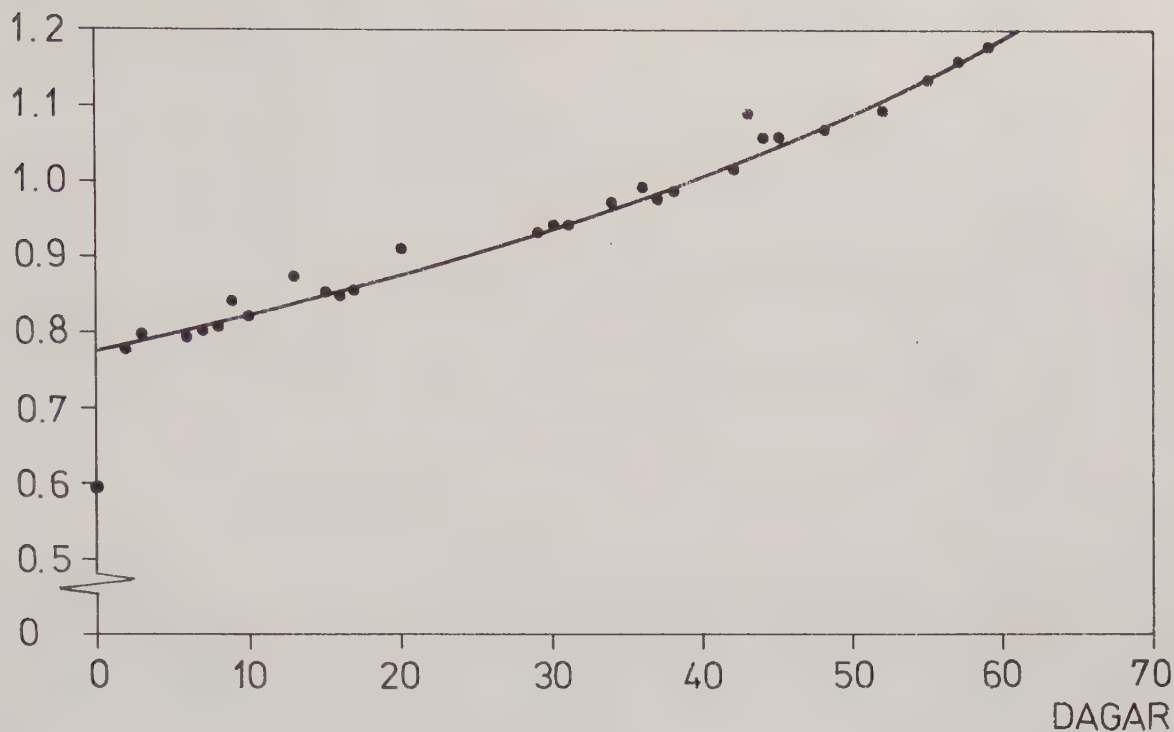
k' -VÄRDE $W/m^2 K$


FIG 18. Värmeflödets variation med kondensationstiden i ett tak isolerat med stenull. Punkterna är mätvärden, den heldragna linjen en med minsta kvadratmetoden anpassad kurva.

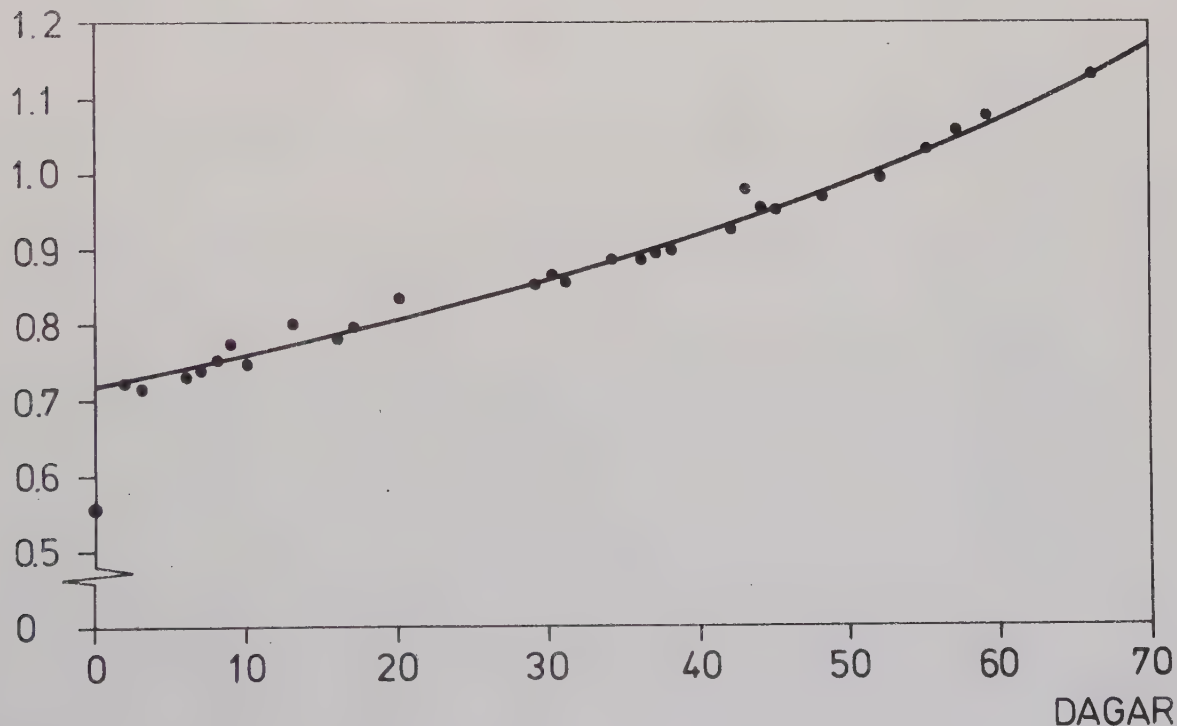
 k' -VÄRDE $W/m^2 K$


FIG 19. Värmeflödets variation med kondensationstiden i ett tak isolerat med glasull. Punkterna är mätvärden, den heldragna linjen en med minsta kvadratmetoden anpassad kurva.

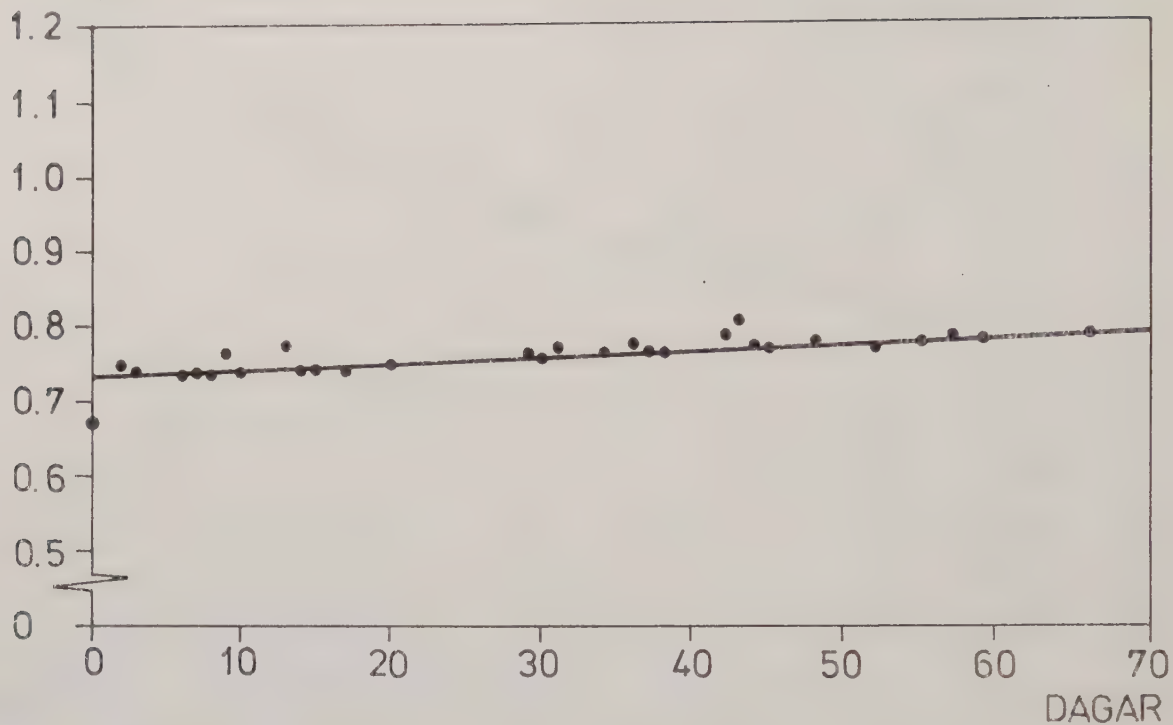
k' -VÄRDE $W/m^2 K$ 

FIG 20. Värmeflödets variation med kondensationstiden i ett tak isolerat med kork. Punkterna är mätvärden, den heldragna linjen en med minsta kvadratmetoden anpassad kurva.

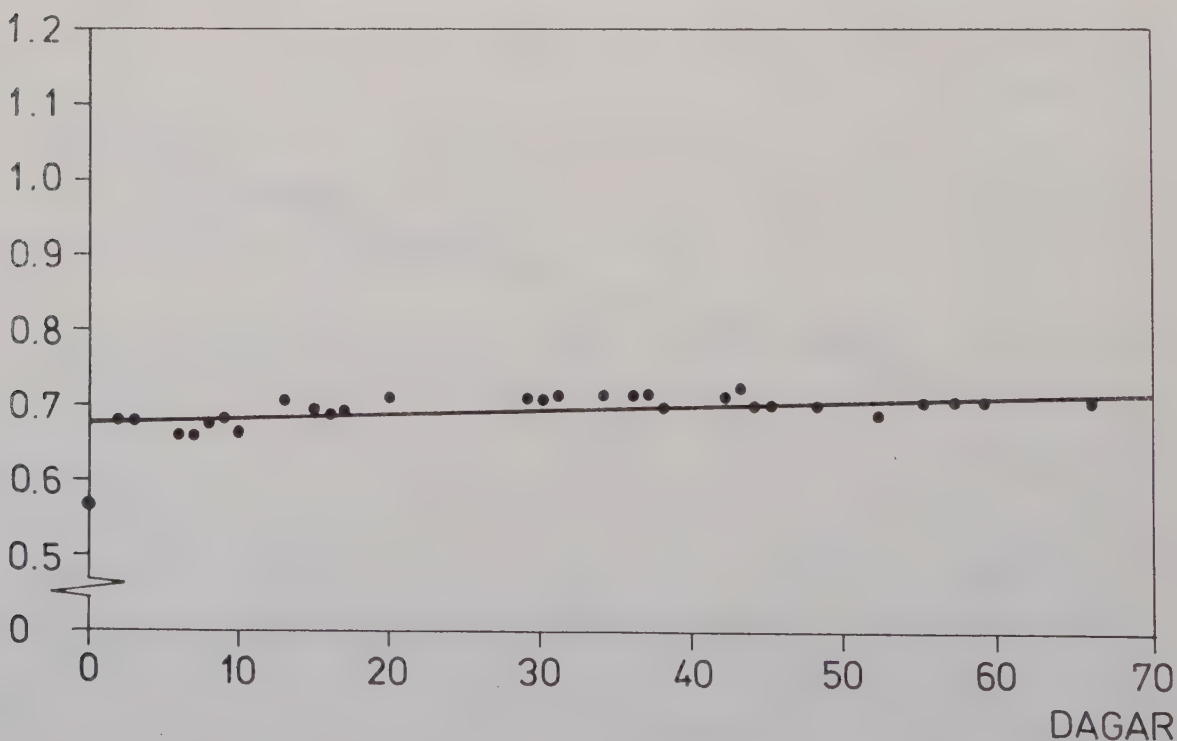
 k' -VÄRDE $W/m^2 K$ 

FIG 21. Värmeflödets variation med kondensationstiden i ett tak isolerat med cellplast. Punkterna är mätvärden, den heldragna linjen en med minsta kvadratmetoden anpassad kurva.

Varför skiljer sig mätta och beräknade värden åt? Beror det på fel i beräkningsmetoden eller beror det på fel i mätningen av värmeflöden enligt figur 16? Är mätmetoden riktig? Värmeflödesmätaren sitter i tätskiktet just ovanför kondenzonen. Vid kondensation frigöres värme som kommer att påverka temperaturfördelningen i taket. Påverkas värmeflödet genom tätskiktet så att det mätta värdet blir för högt? I figuren 22 visas hur ett värmetillskott p g a frigjord kondensationsvärme vid tätskiktet påverkar temperaturfördelningen i taket. Förutsättningen är stationära förhållanden.

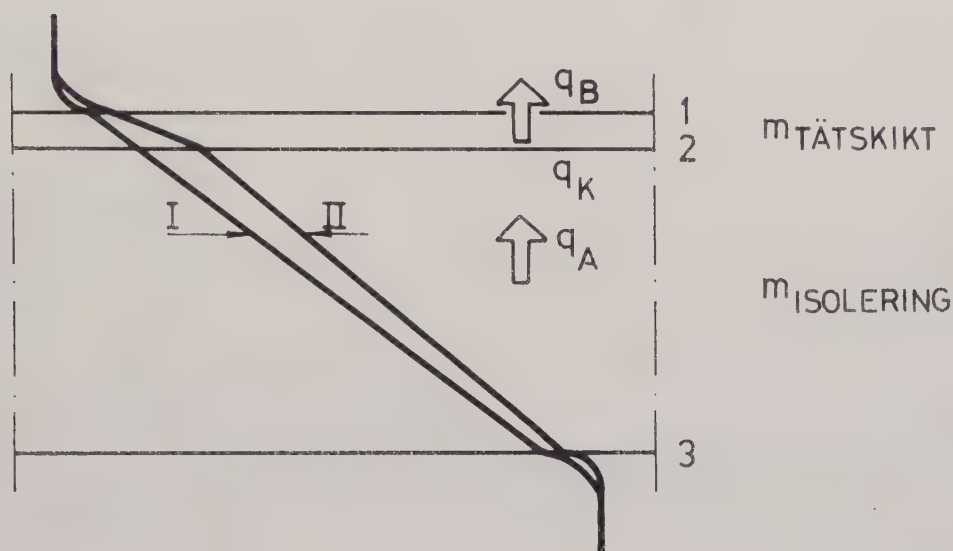


FIG 22. Temperaturfördelning i tak under stationära förhållanden dels utan (I) dels med (II) värmetillskott p g a kondensation.

I normala tak är tätskiktets värmemotstånd avsevärt mindre än isoleringens. I isoleringen är därför kurvorna I och II nästan parallella. I tätskiktet blir lutningen av kurva II brantare än kurva I och skillnaden i lutning kan bli stor. I denna mätning har värmeflödesmätaren legat i just detta område. Det värmeflöde som har mätts är alltså inte flödet in genom takets inneryta utan flödet ut genom tätskiktet. Frågan är vilket flöde som är mest representativt för värmeströmmen genom taket. I det följande förutsätts att det är flödet in genom takets inneryta som beskriver värmeströmmen.

En uppfattning av värmeflödenas storlek i jämförelse med kondensationsvärmets får man av följande beräkning. Följande förutsättningar gäller:

- tak som består av tätskikt + 6 cm värmeisolering
- temperaturskillnad inneryta - ytteryta 27 °C
- skillnad i ånghalt $7,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³
- värmeledningstal och ångtransportkoefficient enligt tabell nr 8.

Först beräknas värmeflödena för materialet glasull ($\lambda = 0,034$ W/m °C, $\delta = 110 \cdot 10^{-7}$ m²/s)

Värmeflöde p g a skillnad i temperatur mellan inneluften t_i och tätskiktet t_t

$$q_1 = \lambda \cdot \frac{t_i - t_t}{d} = 0,34 \cdot \frac{27}{0,06} = 15,2 \text{ W/m}^2$$

Värmeflödet p g a kondensation av ånga och isbildning av kondensatet ($r =$ omvandlingsvärme $2400 \cdot 10^3$ J/kg)

$$q_2 = r \cdot g = r \cdot \delta \frac{c_i - c_s}{d} = 2400 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-7} \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{0,06} = 3,3 \text{ W/m}^2$$

Värmeflödet p g a ångtransport. (C_p är vattenångans specifika värme 1840 J/kg °C)

$$q_3 = g(t_i - t_t) \cdot C_p = 110 \cdot 10^{-7} \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{0,06} \cdot 27 \cdot 1840 = 0,07 \text{ W/m}^2$$

Tillskottet i värmegenomgång p g a fukt

$$\frac{q_2 + q_3}{q_1} = 0,22$$

Samma beräkningar ger för de övriga materialen:

	glasull	stenull	kork	cellplast
q_1	15,2	16,4	19,1	15,6
q_2	3,3	3,6	0,33	0,18
q_3	0,07	0,07	0,007	0,004
$\frac{q_2 + q_3}{q_1}$	22%	22%	1,8%	1,2%

Beräkningen visar att förvandlingen av vattenånga till vatten och is i mineralull frigör värmemängder som är så stora att man måste ta hänsyn till dem.

Värmetillskottet p g a kondensation ger en temperaturhöjning i materialet.

En värmebalansekvation vid skikt 2 i figur 22 ger

$$q_B = q_A + q_K$$

Värmeflödena q_A och q_B kan vid stationära förhållanden skrivas

$$q = \frac{\Delta t}{m}$$

där Δt är temperaturskillnaden över den betraktade delen och m är värmemotståndet över samma del.

$$q_A = \frac{t_i - t_2}{m_i + m_{isol}}$$

$$q_B = \frac{t_2' - t_u}{m_t + m_u}$$

där

t_2' är temperaturen i skikt 2

t_i och t_u är inne- resp utetemperatur

m_i , m_{isol} , m_t och m_u är värmemotståndet i gränsskiktet, inne, värmeisoleringen, tätskiktet och gränsskiktet ute respektive.

$$q_K = q_B - q_A = \frac{t_2' - t_u}{m_t + m_u} - \frac{t_i - t_2'}{m_i + m_{isol}}$$

$$q = \frac{t_i - t_u}{m}$$

q är värmeflödet genom torrt material utan kondensation.

Vid beräkningen används följande siffervärden. Observera att ute- och innetemperaturerna antas konstanta och -10 resp $+20$ °C. Med siffervärdena på m_i och m_u och m_t blir Δt inte alltid lika med det tidigare antagna 27 °C

	glasull	stenull	kork	styrencellplast
q_k (= q_2 tidigare)	3,3	3,6	0,33	0,18
m_i	0,13	0,13	0,13	0,13
m_{isol}	1,77	1,62	1,40	1,71
m_t	0,20	0,20	0,20	0,20
m_u	0,04	0,04	0,04	0,04
t_i	20	20	20	20
t_u	-10	-10	-10	-10

För glasull fås temperaturen ur följande

$$q_k = \frac{t_2' - t_u}{m_t + m_u} - \frac{t_i - t_2}{m_i + m_{isol}}$$

$$3,6 = \frac{t_2' + 10}{0,24} - \frac{20 - t_2'}{1,90}$$

$$t_2' = -5,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Om ingen värme utvecklas vid 2 hade temperaturen där blivit

$$t_2 = -6,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q_A = \frac{20 - (-5,86)}{1,90} = 13,65$$

$$q_B = \frac{-5,86 - (-10)}{0,24} = 17,25$$

$$q = \frac{30}{2,14} = 14,05$$

För övriga material blir temperaturen i snitt 2 med och utan värmekorriger

	t_2'	t_2
glasull	-5,86	-6,63
stenuull	-5,57	-6,39
kork	-5,86	-5,93
styrencellplast	-6,50	-6,54

För mineralull får man en temperaturhöjning av ca 0,8 °C och för de övriga < 0,1 °C.

Om man nu för mineralull mäter värmeflödet q_p istället för flödet q som man avsåg får man ett värde som är 20 - 25% högre. För övriga material är motsvarande värde < 2% högre. Svårigheten ligger i att man inte har definierat vilka värmeförluster som skall ingå i k -värdet.

För att ytterligare belysa problemet värmeflöde vid kondensation har en serie försök utförts i ensidig plattapparat. Mätutrustningen beskrives noggrant av Bankvall 1970. Provkroppen bestod av en 6 cm tjock värmeisoleringskiva med 35 cm diameter. Skivans ovansida var försedd med ett tätskikt av asfaltmatta. Under provkroppen placerades en fuktig, porös duk (typ diskduk) med en bestämd mängd vatten. Temperaturskillnaden mellan ovansida och undersida, dvs under diskduken, var 40 °C. Kalla ytan var -10 °C. Denna temperaturskillnad orsakar en fuktvandring från den varma, fuktiga sidan mot den kalla. Under mätningen hölls temperaturerna konstanta och värmeflödet till varma plattan registrerades. Värmeflödet påverkas av dels ångbildningen vid varma sidan, dels kondensationen vid tätskiktet och så länge det finns fukt kvar i duken och fuktvandringen och kondensationen pågår kommer också värmeflödet att vara större än värmeflödet genom torrt material.

En beräkning av ökningen i värmeflöde p g a ångbildning och kondensation vid tätskiktet ger på samma sätt som tidigare med

$$q_1 = \lambda \cdot \frac{t_i - t_t}{d}$$

$$q_2 = r \cdot g$$

$$q_3 = g (t_i - t_t) \cdot C_p$$

och med de speciella förutsättningarna för detta försök:

	stenull	glasull
q_1	24,5	22,6
q_2	12,6	11,6
q_3	0,26	0,24
$q_2 + q_3$	52%	52%
q_1		

TILLFÖRD VÄRMEEFFEKT %

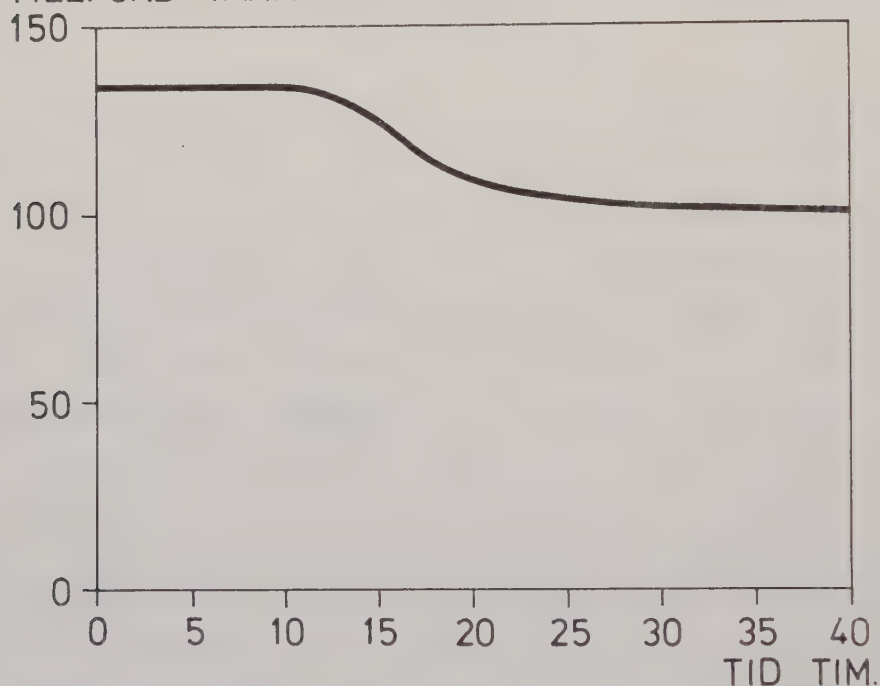


FIG 23. Variation i tillförd värmeeffekt till varma plattan i en plattapparat vid mätning under kondensation. Provkroppen består av mineralull med tätskikt på kalla sidan och fukten tillsättes från undersidan i en fuktig duk. Så länge duken är fuktig är tillförd effekt konstant men när den börjar torka ut sjunker effekten för att efter ca 30 timmar åter vara konstant.

I figur 23 visas hur den tillförda värmeeffekten till varma plattan i plattapparaten varierar under försöket. Variationen i effekt är ett direkt mått på λ -värdets försämring. Under kondensationen vid mätningens första 10 - 15 timmar blir det resulterande λ -värdet 0,085 W/mK vilket ger ett k-värde av 0,92 W/m²K. När all fukt konden-

serat och jämvikt åter erhållits efter ca 30 timmar blir λ -värdet 0,045 W/mK och k-värdet 0,59 W/m²K. Värmefflödesökningen under kondensationen är 55%.

Mätningen visar att värmefflödet minskar efter 10 - 15 timmar och efter ca 30 timmar har det nått en konstant nivå. En beräkning av kondensationstiden för den aktuella mängden vatten ger tiden 40 timmar till fullständig uttorkning. Efter detta ligger värmefflödet på en nivå som motsvaras av helt torrt värmeisoleringsmaterial, dvs fukt-mängden som har passerat in i materialet ger mycket liten försämring av värmeledningsförmågan. Ångbildnings- och kondensationsvärmets ger emellertid stora variationer i det mätta värmefflödet under kondensationen.

Sammanfattning

Ökningen av det mätta värmefflödet p g a kondensation blir för mineralull ca 25% och för kork och cellplast 2 resp 1,5%.

Sammanfattas beräkningarna ovan fås följande resultat för k'-värdet genom mättaket.

	nominellt k'-värde	beräknad "ökning" av det nominella k'-vär- det p g a kondensation	mätt k'-värde	
			1	2
glasull	0,56	0,14	0,75	0,72
stenu	0,60	0,15	0,76	0,78
kork	0,67	0,01	0,74	0,73
cellplast	0,57	0,01	0,69	0,69

Risk för ytkondensation på takets undersida

Om temperaturen på takets undersida sänks ökar risken för ytkondensation direkt mot den bärande plåtens undersida. Temperatursänkningens storlek bestäms av värmeisoleringsgraden i taket och av genomföringar som kan ge köldbryggor.

Risken för kondensation mitt på takytan framgår av figur 24. För olika utetemperaturer anges högsta tillåtna relativa luftfuktighet inomhus vid olika värmeisoleringsgrad i taket för att ytkondensation skall undvikas.

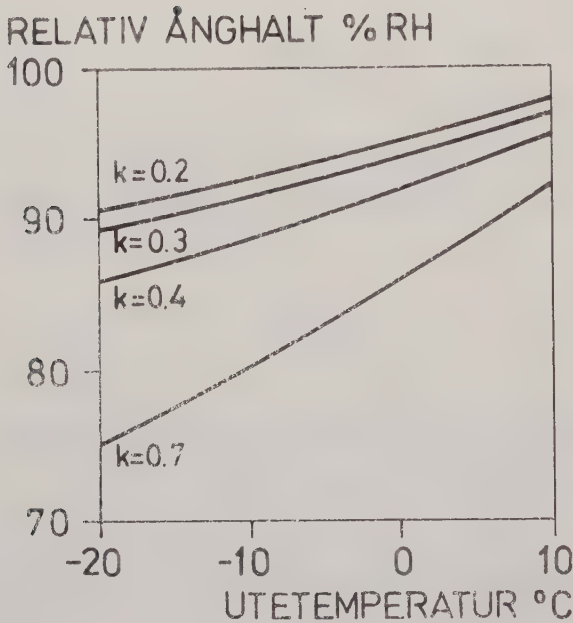


FIG 24. Ytkondensation på takets undersida vid olika värmeisoleringsgrad. Förutsättningar för figuren är $m_i = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ och $m_u = 0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$. Innetemperatur $t_i = 20^\circ\text{C}$.

Risken för kontinuerlig ytkondensation är mycket liten. Ånghalten inomhus understiger i normala fall den kritiska gränsen med bred marginal, där isoleringen är obruten.

Vid anslutningar till andra byggnadsdelar, vid hörn eller vid köldbryggor kan lägre temperaturer på takets insida lokalt förekomma. En mekanisk infästning av tätskiktet med metallbult är en köldbrygga. Mitt för en sådan metallbult kan man få temperatursänkning som kan orsaka kondensutfall.

I en undersökning av risken för sådant kondensutfall har några av de

idag använda förankringstyperna provats i ett 5 cm tjockt mineralulls-isolerat tak. Undersökningens resultat kan presenteras som en temperatursänkning mitt för köldbryggan jämfört med temperaturen intill. Då får man en uppfattning om isoleringsförsämringen. De nedan angivna temperaturskillnaderna Δt mellan temperaturen på takets inneryta där isoleringen är obruten och temperaturen mitt för en metallbult är medelvärden av tre mätningar. Temperaturskillnaden mellan inne och ute är 28°C .

Typ av förankring	Yttemperatursänkning vid förankringen. $\Delta t^{\circ}\text{C}$
popnitad plåtförankring	0,9
lödd plåtförankring	0,9
svetsad pinnbult med påsticksskiva	0,7
skruvad pinnbult med skiva	1,6

Skillnaden i temperatur mellan olika infästningstyper kan bero på deras speciella egenarter. Någon skruvas, någon svetsas, någon lödes. Mätpunkten på takets undersida där temperaturen skall mätas med termoelement är därför olika väl definierad.

I samtliga fall är de mätta temperatursänkningarna mycket låga. Praktiskt har de ingen betydelse. Risk för lokal ytkondensation är liten vid normala inneklimat. Med de provade infästningarna krävs vid en temperaturdifferens av 45°C ($t_u = -25$, $t_i = 20^{\circ}\text{C}$) en relativ luftfuktighet inne på mellan 70 och 75%.

Det bör påpekas att mätningen bara är gjord för en tjocklek av konstruktionen, nämligen 5 cm. Vid tjockare värmeisolering blir effekten av köldbryggor absolut sett mindre och risken för lokal ytkondensation liten.

3.3 TRANSPORT I SPRINGOR MELLAN VÄRMEISOLERINGSSKIVOR

När man lägger värmeisoleringen ovanpå plåten strävar man efter att få så god anliggning mellan skivorna som möjligt. På grund av måtttoleranser, skevhet hos plattorna, rörelser av temperatur och fuktighet m m uppstår det alltid mellanrum, springor i skarvarna, mellan isolerskivorna. Detta avsnitt handlar om tänkbara transportmekanismer i dessa springor. Det bör nämnas att springorna i praktiken inte är ideala luftkanaler som antas i det följande. Varm asfalt rin- ner ner vid utläggningen av tätskiktet (om detta är papp eller annat material som klistras med asfalt). Om man använder ett tätskikt som förankras mekaniskt till plåten får man dock springor som liknar dem som framställningen talar om.

Figur 25 visar hur en sådan springa ger luften i plåtkanalen fri passage till tätskiktet. Springan kan gå i plåtriktningen eller tvärs den. Transportmekanismerna blir desamma.

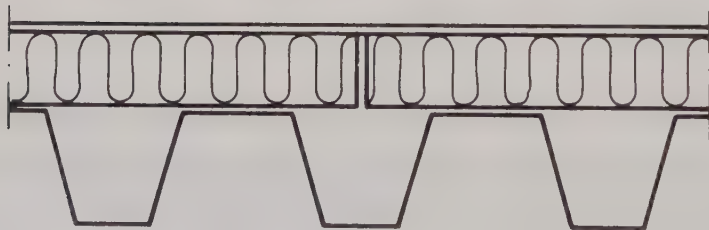


FIG 25. Exempel på springa i skarven mellan isolerskivor. Skarven har här ritats parallellt med plåtkanalen och vetter direkt mot luften där.

Springbredden i skarvarna har studerats på några utförda tak. När värmeisoleringen var utlagd mättes springan på två ställen på varje skarv. I det ena fallet gäller det ett tak med asfaltklistrad cellplastisolering, i det andra ett mineralullsisolerat tak med mekanisk förankring. Resultatet av studien sammanfattas i tabell 3.

TABELL 3. Mätta springbredder mellan värmeisolerings-skivor. Tabellen visar fördelningen mellan springbredden i utförda tak med dels cellplast dels mineralull.

Material		0 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	>5 mm
	skarv							
Cellplast	antal	93	136	56	20	13	8	3
"	%	28	41	17	6	4	2	2
Mineralull	antal	107	33	24	16	10	1	5
"	%	55	17	12	8	5	1	2
Totalt	antal	200	169	80	36	23	9	8
"	%	38	32	15	7	5	2	1

Tabellen gör inte anspråk på att ge en fullständig bild av skarvproblemet. Den visar dock att väl utförda isoleringsarbeten ger ett färdigt tak med få breda skarvar. Studien visar att det är något svårare att lägga cellplastskivor kant i kant än mineralullsskivor. Andelen breda skarvar är emellertid lika för bägge material. Fogar som är 5 mm eller bredare förekommer i 4% av fallen på cellplasttaket och i 3% på mineralullstaket. Den bredaste skarven som uppmättes var 7 mm på cellplast och 10 mm på mineralull.

3.3.1 Diffusion i springor mellan värmeisolerings-skivorna

Vid fukttransport p g a diffusion i luften i springor gäller ekv. (1).

$$g = - D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

Ekvationen gäller vid endimensionellt flöde. Om flödet är stationärt kan man ersätta ånghaltsgradienten med differenser

$$g = - D \frac{c_1 - c_2}{d} \quad (1 a)$$

Vid transport genom en skarv blir fuktflödet per längdmeter

$$g_s = - b \cdot D \cdot \frac{c_1 - c_2}{d} \quad (1 b)$$

där b är springans bredd m.

Om luften i plåtkanalen har högre ånghalt än mätnadsånghalten vid tätskiktets undersida får man transport upp mot tätskiktet och kondensation där. Följande exempel visar vilka fuktmängder som transporteras p g a diffusion.

- Antag en 5 mm bred skarv mellan 6 cm tjocka värmeisoleringskivor.
- Antag en konstant temperatur på tätskiktet av -10°C och i plåtkanalen $+20^{\circ}\text{C}$ 40% RF. Den transporterade fuktmängden kan beräknas ur ekv (1 d)

$$g_s = -b \cdot D \cdot \frac{c_1 - c_2}{d} = 0,005 \cdot 23 \cdot 10^{-6} \frac{(6,91 - 2,14) \cdot 10^{-3}}{0,06} =$$

$$= 0,9 \cdot 10^{-8} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

- Denna fuktmängd motsvarar vid stationära förhållanden en kondensmängd vid tätskiktet av 0,1 mm/dygn. Denna mängd är ganska liten och kan under normala förhållanden inte ge avsevärda fuktmängder som kan orsaka skada.

3.3.2 Konvektion i springor mellan värmeisoleringskivorna

Om luften i springan kommer i rörelse och tillåts cirkulera kan varm luft från plåtkanalen transporteras upp i skarven och passerar då också tätskiktet. Om temperaturen där är lägre än vad som motsvarar mätnadsånghalten för luften kan vattenånga kondensera. Luftrörelser i skarven kan vara av två slag, naturliga eller påtvingade.

Påtvingade luftrörelser är sådana som beror på skillnaden i lufttryck i olika delar av lokalen och olika delar av spalten. De kan vara av samma slag som de som beskrivs av figur 13. Risken för konvektion, luftrörelser, i skarvarna är större än risken för konvektion i material.

Naturliga luftrörelser kan orsakas av temperaturvariationer i skarven. Den kalla luften i skarvens övre del är tyngre än luften inne. Vid lämpliga dimensioner på skarven kan egenkonvektion utbildas.

Om det förekommer luftrörelser i skarvarna finns det risk för kondensation av fuktig luft mot tätskiktet. Mängden kondensat blir större än p g a diffusion. Figuren 26 som är direkt beräknad ur vattenångans mätnadskurva visar när det finns risk för kondensutfällning vid tät-

skiktet. Figurens förutsättningar är en konstant innetemperatur av 20°C under taket. Figuren anger då vid vilken temperatur som ytkondensation mot tätskiktet börjar vid olika relativ ånghalt inne.

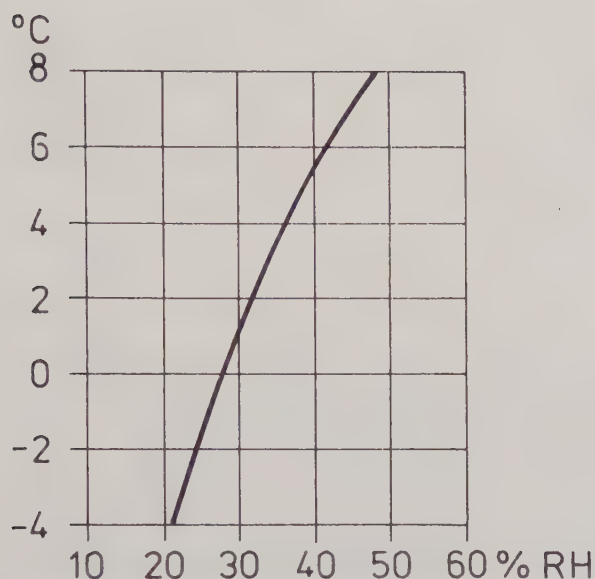


FIG 26. Ytemperatur vid tätskiktet vid olika relativa luftfuktigheter inomhus då risk för ytkondens föreligger. Innetemperatur 20°C .

Även vid mycket måttlig fuktbelastning i plåtkanalen föreligger risk för kondensation mot taktäckningen vid inte särskilt låg utetemperatur. Vid en så pass måttlig utetemperatur som -5°C måste den relativa luftfuktigheten i plåtkanalen vara mindre än 20% för att ytkondensation skall undvikas. Därför är risken för ytkondensation stor i springor mellan isolerskivorna.

Vilka är då förutsättningarna för naturlig konvektion i en skarv, vilka temperaturskillnader krävs och vilka dimensioner? Detta har behandlats av Bankvall 1972.

Allmänt kan värmeflödet p g a konvektion i en horisontell luftspalt beskrivas med hjälp av Rayleightalet och spaltens dimensioner.

$$Ra = C_{\text{luft}} \cdot \Delta T \cdot h^3$$

där

ΔT = temperaturskillnad K mellan spaltens under- och översida

h = skarvens höjd m

$$C_{\text{luft}} = \frac{g}{a \cdot \nu \cdot T_m}$$

g = tyngdaccelerationen m/s^2

a = temperaturledningstalet m^2/s

ν = kinematisk viskositet m^2/s

T_m = medeltemperatur i spalten K

C_{luft} är beroende av gasens egenskaper och av medeltemperaturen T_m .

För en variation i T_m från 0 - 10 °C varierar C_{luft} från $1,4 \cdot 10^8$ till $1,2 \cdot 10^8$.

Kriteriet för naturlig konvektion i en horisontell spalt är att $Ra \geq 1700$. Detta gäller i en spalt med oändlig utbredning. Om spalten får dimensionsbegränsningar som när man för in vertikala väggar i spalten för att efterlikna en skarv mellan värmeisoleringskivor ändras kriteriet för naturlig konvektion. Catton och Edwards 1967 har undersökt hur kriteriet ändras. Deras mätningar gäller naturlig konvektion i en horisontell spalt där begränsningarna har hexagonal form. Genom att variera förhållandet mellan spaltens höjd h och avståndet mellan motstående väggar b får de fram ett dimensionsberoende för den naturliga konvektionen. I figur 27 visas strömningsanalogin till springan mellan två värmeisoleringskivor.

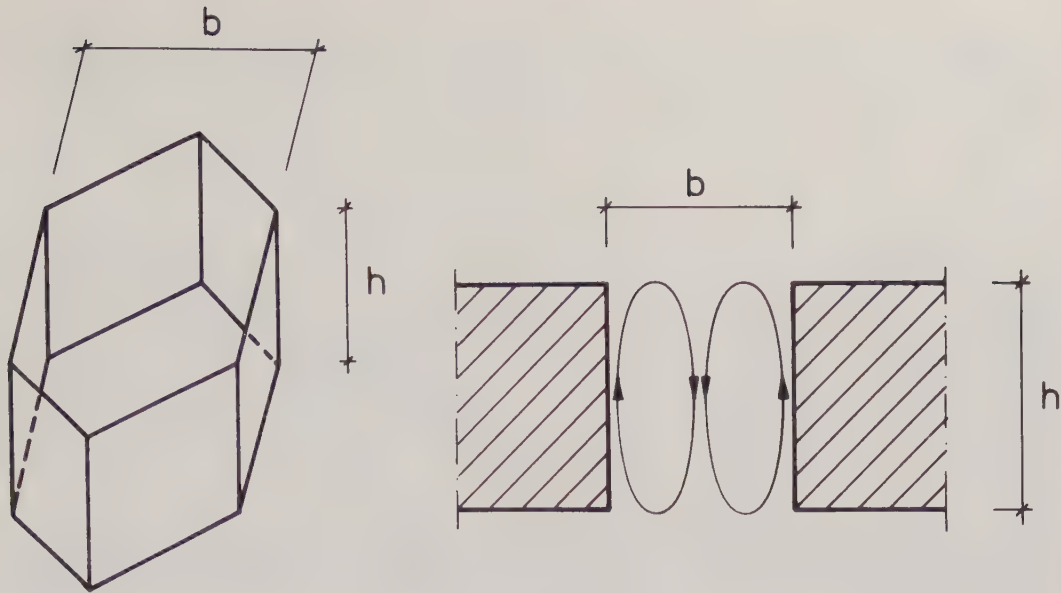


FIG 27. Naturlig konvektion i en horisontell spalt som avgränsas av vertikala väggar. Till vänster den av Cotton och Edwards 1967 använda strömningsvolymen. Till höger en tänkbar strömningsbild i skarven mellan två värmeisoleringskivor.

Förhållandet h/b påverkar dels förekomsten av naturlig konvektion men också omfattningen av luftrörelser. I figuren 28 visas värmeledningsökningen som funktion av Rayleightalet vid olika h/b -värden. Värmeledningsökningen beskrivs av Nusselt-talet

$$N_u = \lambda_k / \lambda$$

där

λ_k = värmeledningstalet vid konvektion

λ = värmeledningstalet i stillastående luft.

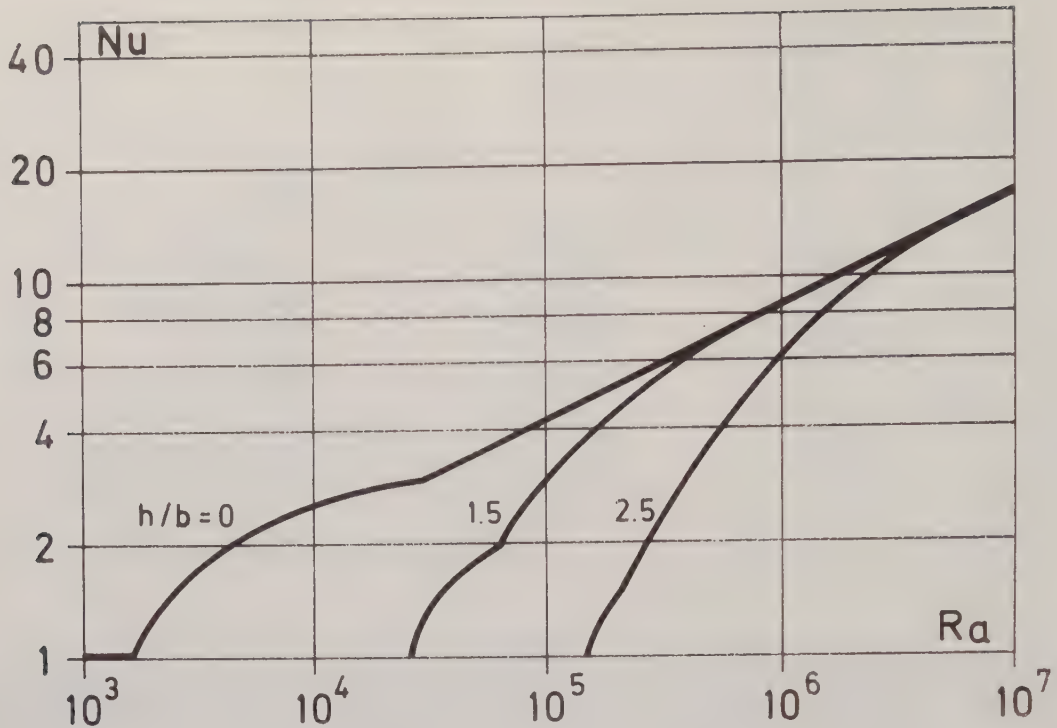


FIG 28. Vertikala väggars inflytande på den konvektiva värmetransporten i en horisontell spalt. Efter Catton och Edwards 1967.

Ett exempel på strömning i en skarv visas i figuren 27. Förhållandet h/b blir för normalt utförda skarvar 10 - 100.

De här angivna sambanden är tillräckliga för att bedöma risken för konvektion. Följande exempel skall belysa hur man kan göra sådana bedömningar.

- Antag ett tak med 10 cm tjock värmeisolering. Antag att skarvvidden i något fall är 5 mm. Antag en innetemperatur av $+20^{\circ}\text{C}$ och en temperatur på tätskiktet av -10°C .
- $C_{\text{luft}} = 1,3 \cdot 10^8$
- $\Delta T = 30 \text{ K}$
- $h = 0,1 \text{ m}$
- $Ra = 1,3 \cdot 10^8 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 3,9 \cdot 10^6$
- Ra-talet är avsevärt högre än 1700 och egenkonvektion i ostörd, horisontell spalt är möjlig. För strömning i skarv blir $h/b = 20$. Fig 28 ger ingen upplysning om förutsättningarna för konvektion vid så höga h/b -värden.

Vid tillräckligt breda skarvar är h/b så lågt att strömningsbilden i

figur 27 är tänkbar. Även andra icke symmetriska strömningsmönster kan tänkas uppkomma. De är emellertid inte utredda i den här studerade litteraturen.

För normala förhållanden kan naturlig konvektion förekomma i skarven. Vid tillräckligt stor temperaturskillnad kommer luften att själv cirkulera. Luften i plåtkanalen kan transporteras upp till tätskiktet och fukten kan kondensera. Med denna transportmekanism kan flera gånger mer fukt transporteras upp i skarven än med diffusion.

Så länge transporten av fukt sker i ångfas är transportmekanismen fuktkonvektion identisk med mekanismen värmetransport p g a konvektion.

Det skall nämnas att det vid laboratorieförsöken, som beskrives i avsnitt 3.3.4, kondenserade avsevärt mycket mer fukt vid tätskiktet än vad som motsvaras av enbart diffusion.

3.3.3 Transport p g a tyngdkraft i skarvar

Som tidigare nämnts kan transporten p g a tyngdkraft i materialet ibland vara svår att skilja från kapillärtransporten. I skarven mellan isolerskivorna gäller det dock renodlad transport p g a tyngdkraft.

Förutsättningen för transportmekanismen är fritt vatten mot tätskiktet i skarvens överdel. Detta vatten kan ha kondenserat efter en längre eller kortare period. Det kan ha runnit ner i skarven eller ut i värmeisoleringen direkt efter kondensationen men också ackumulerats som is för att frigöras vid ett plötsligt väderomslag. Är skarven bred kan vattnet droppa direkt ner i plåtkanalen. Vid smalare springa påverkas transporten av värmeisoleringsmaterialets egenskaper. Släta materialytor tillåter vattnet att rinna ner och porösa ytor absorberar vattnet. Transporten i springor mellan cellplastskivor bör därför vara större än transporten mellan skivor av mineralull. Det är även klart att springornas dimensioner direkt avgör eventuell vatten-transport och dennas storlek.

3.3.4 Kondensation i springor i skarvar. Laboratorieförsök

I några laboratorieförsök har olika material undersökts med hänsyn till risk för dropp från skarvarna. Försöken har genomförts med olika skarvvidder, olika kondensationsperioder före tö och olika material. Skarvarna har varierat från 0 till 15 mm i intervall om 2,5 mm. Kondensationstiden har varit 1 - 5 dygn. Följande material har använts:

glasull 120 kg/m³

stenull 200 kg/m³

stenull högabsorberande (används normalt vid odling av växter)

kork 160 kg/m³

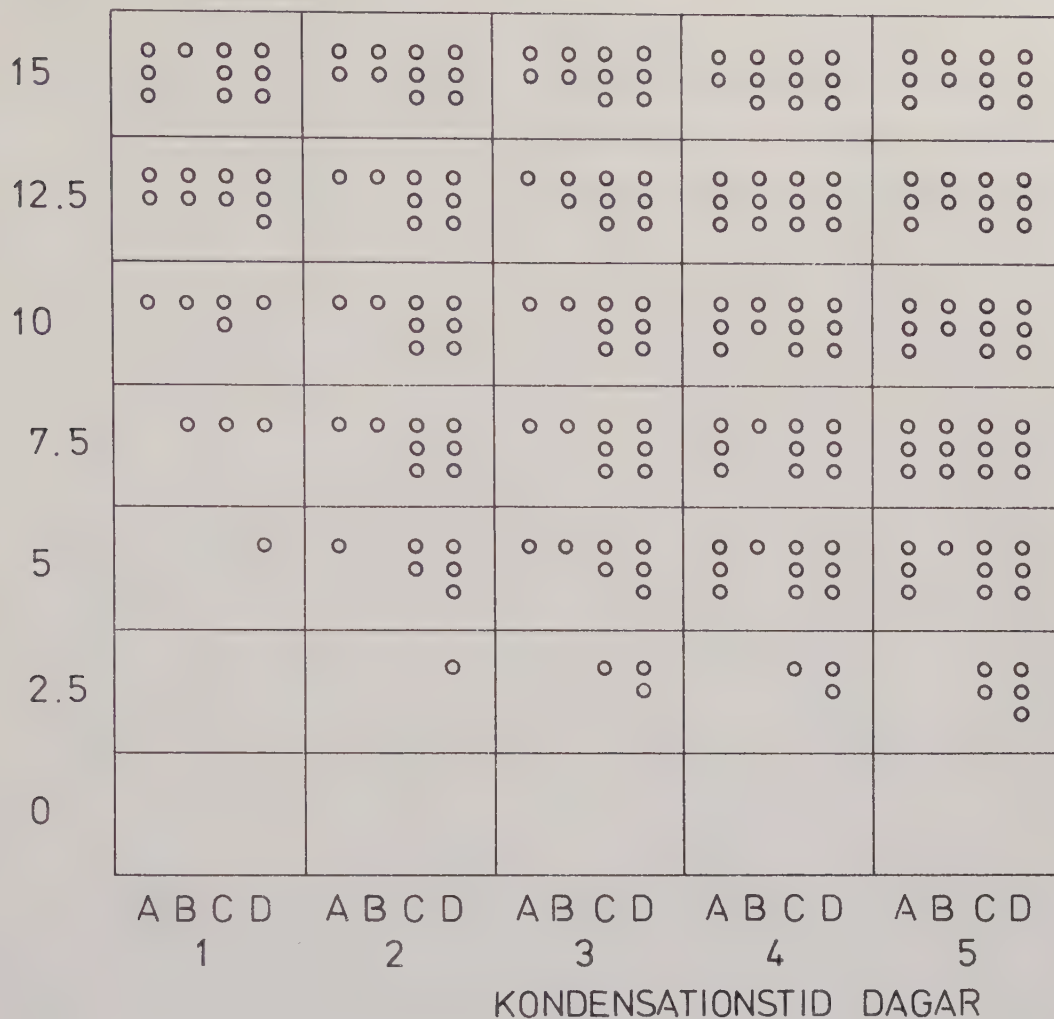
styrencellplast 20 kg/m³

Provet har haft följande förlopp. "Taket" består av 6 cm tjock värmeisolerings med tätskikt. Isoleringen är lagd i stavar och mellan stavar olika breda skarvar. Först hålls klimatet konstant med 22 °C 50% RF inne och -10 °C ute. Efter kondensationstiden höjs temperaturen på tätskiktet till ca +15 °C med bl a strålningsvärmare. Då smälter kondensatet och eventuellt dropp noteras.

Under töperioden mäts mängden fukt som droppar ner från skarven. Resultatet av denna mätning visas i figurerna 29 och 30. Dropparna registreras på fuktkänsligt papper omedelbart under skarven mellan isoleringsskivorna. En droppe som träffar papperet ger ett tydligt, bestående avtryck som kan tolkas även efter att vattnet har torkat.

I figurerna har tre olika droppningsintensiteter lagts in. 3 betyder stora mängder dropp från hela spalten, 2 några droppar och 1 en enskild droppe från någon del av skarven.

SPALTVIDD mm



A = Glasull

B = Stenull

C = Kork

D = Polystyren

o

o = Avsevärda mängder dropp

o

o

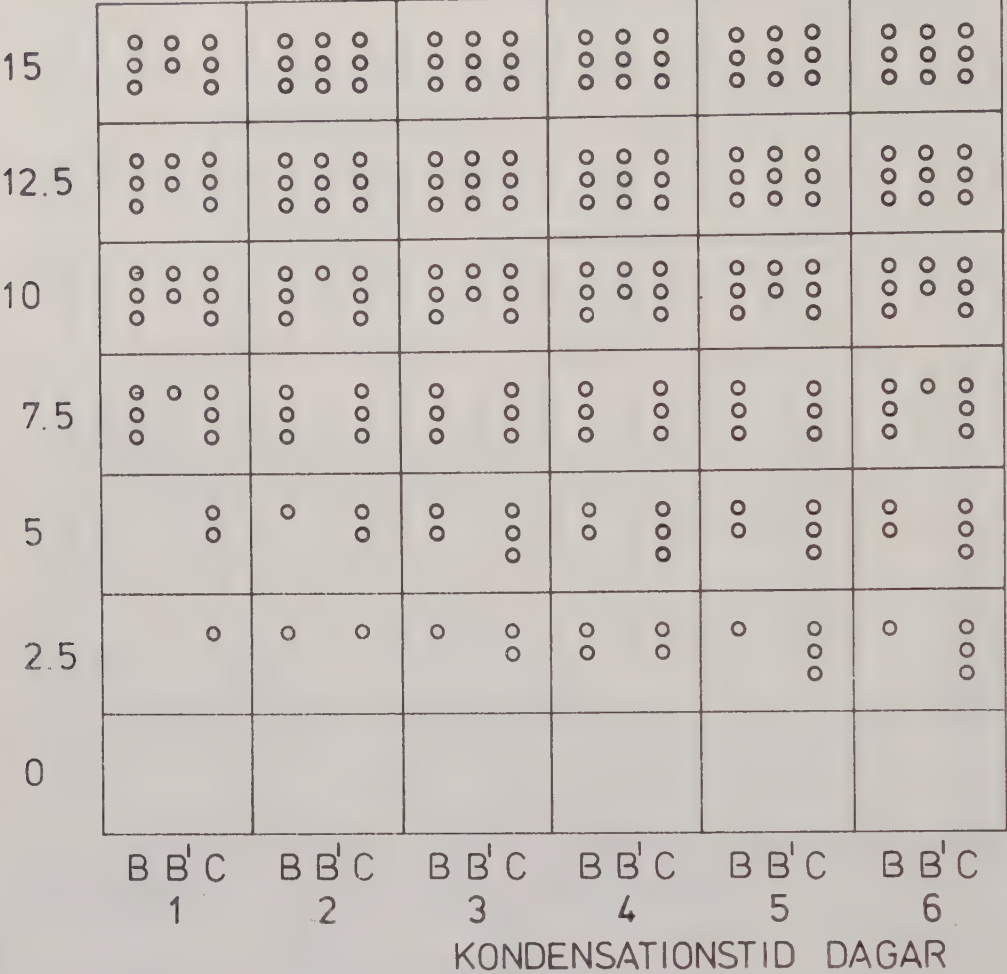
o = Något dropp

o

o = Enstaka droppar

FIG 29. Dropp från spalter i olika isoleringsmaterial vid töperiod efter en period av kondensation.

SPALTVIDD mm



B = Stenull

B' = Högabsorberande mineralull

C = Kork

○
○ = Avsevärda mängder dropp
○

○
○ = Något dropp
○

○ = Enstaka droppar

FIG 30. Dropp från spalter i olika isoleringsmaterial. En jämförelse mellan "normala" värmeisoleringsmaterial kork C och stenull B och extremt vattenabsorberande mineralull B'.

Tabellerna skall tolkas på följande sätt. Exemplet gäller figur 29, material A, glasull. Efter ett dygns kondensation och upptining av kondensatet droppar det ur skarvar med vidden större än 10 mm. Ur 15 mm-skarven droppar det på några ställen och ur 10 mm-skarven kommer en eller två droppar. I de mindre skarvarna absorberas vattnet av isoleringen och droppar aldrig ner som fritt vatten.

Ökas kondensationsperioden före töperioden till t ex 5 dygn, blir droppet rikligt för alla skarvar från 5 mm och uppåt.

De porösa mineralullsisoleringarna ger båda ungefär samma resultat. Kork och cellplast ger betydligt större mängder, vilket beror på att dessa material inte absorberar det smälta kondensatet i samma grad som mineralullen. Det droppar vatten ur smalare skarvar i kork och cellplast än i mineralull vid samma kondensationsperiod. Redan efter 2 - 3 dygns kondensation ger dessa material dropp vid så smala skarvar som 2,5 mm. Mineralullen ger inte i något fall dropp vid denna vidd vid kondensationsperioden 5 dygn eller kortare.

I den andra tabellen, figur 30, jämförs dropprisken för kork, stenull och absorberande stenull. Det senare materialet som inte är avsett som värmeisolering i byggnader har behandlats så att det kan absorbera och sedan hålla vatten under lång tid. Materialet är emellertid intressant ur den här studerade aspekten som jämförelse till vanliga takisoleringsmaterial.

Resultatet för kork och vanlig stenull skiljer sig något i denna mätningen från den tidigare. I princip överensstämmer dock resultaten.

Materialet B' visar avsevärt bättre egenskaper än övriga material. Blott vid skarvvidder större än 10 mm blir droppet av stor omfattning. För 7,5 mm skarv får man inte droppar förrän efter 6 dygns kondensation. Slutsatsen blir den att den absorberande mineralullen skulle om den användes för takisoleringssändamål, kunna läggas med upp till 10 mm breda skarvar utan risk för dropp. Skillnaden är avsevärd mellan detta material och kork och styrencellplast. Skillnaden är mindre till vanlig mineralull.

3.3.5 Fukttransport i skarvar. Sammanfattning

Skarvarna utgör normalt inget problem, varken ur fukt- eller värme-synpunkt. Normalt blir skarvvidden mindre än 3 mm. Om samtliga skarvar vore 3 mm på ett tak hade detta givit blott 2% högre värmegenomgång än om taket varit skarvlöst. Problem kan dock uppstå lokalt vid breda skarvar.

Det viktigaste är istället risken för dropp från skarven. Den är olika för olika material men allmänt kan sägas att skarvar i kork och styrencellplast kan ge dropp betydligt oftare än skarvar i mineralull. Mängden kondensat i skarven beror ju inte på materialet, utan är lika för alla material. Men återtransporten av vatten från tät-skiktet är olika.

4 FUKTBALANS I TAK

I detta avsnitt diskuteras hur fukt transporteras i takkonstruktioner av olika utförande vid olika yttre betingelser. Först diskuteras fuktbalansen i ett homogent tak av t ex gasbetong. Framställningen bygger på Sandbergs 1973 metodbeskrivningar för beräkning av fukt-tillstånd och fuktbalans i tak. Sandbergs framställning gäller både hygroskopiskt och icke hygroskopiskt material.

Fuktvandringen och fukthaltsfördelningen i ett tak bestäms av begynnelsefukthalten, av randvillkoren och av materialegenskaperna. För ett material som är hygroskopiskt betyder det att varje relativ luftfuktighet står i jämvikt med en speciell fukthalt i materialet. Sambandet beskrivs med sorptionskurvor. Dessa kurvor får något varierande utseende om de bestäms vid uppfuktning eller vid uttorkning. Materialet innehåller alltså fukt även om det inte finns i form av fritt vatten.

Fuktbalansen i ett homogent tak av hygroskopiskt material kan kortfattat beskrivas på följande sätt.

Antag att klimatet på takets undersida i genomsnitt ger en lägre fuktbelastning under året än vad som i genomsnitt motsvaras av mätnadsfukthalten vid takets yta. Detta antagande innebär att taket under en årscykel inte tillförs mer fukt via kondensation än vad som under året kan torka ut från taket. Det ackumuleras således ingenting i materialet.

Under den tid av året som ånghanen på takets undersida är högre än mätnadsånghanen vid tätskiktet kommer fukt att transporteras in i konstruktionen. Under den kalla delen av året tillförs fukt, under den varma delen avgår fukt. I fig 20 visas medelfukthaltens variation under två år för ett sådant tak. De streckade kurvorna anger årsmedelvärdet av fukthalten i konstruktionen. I exemplet I antas att begynnelsefukthalten är noll. I exemplet II antas en begynnelsefukthalt t ex byggfukt hos materialet.

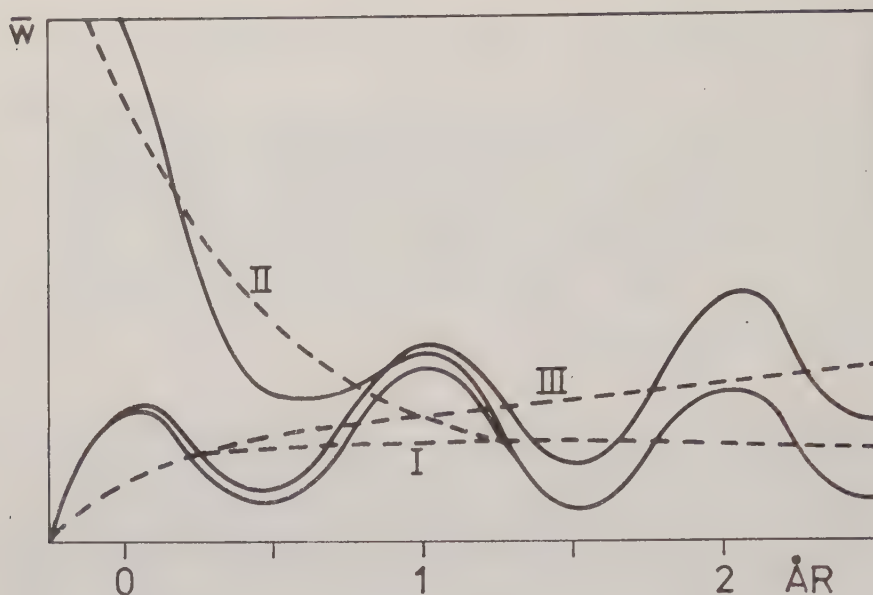


FIG 30. Medelfukthaltens variation i ett gasbetongtak under olika klimatförutsättningar.

Kurvan III visar hur fukthalten varierar med tiden i en konstruktion som är utsatt för större fuktbelastning under vinterhalvåret än vad som kan torka ut under sommaren. I detta fall ackumuleras således fukten i taket.

De beskrivna förloppen är långsamma. De slutgiltiga fukttillstånden när inget fuktutbyte sker vid ytan och ingen omlagring sker i materialet inträffar aldrig i praktiken. Klimatet vid omslutande ytor ändras ständigt och fukt tillförs och bortförs från taket.

4.1 FUKTBALANS I PLÅTTAK

Fuktvariationerna i ett gasbetongtak är så långsamma att det räcker att använda årsmedelvärden för bedömning av skaderisk. Men det som för gasbetong sker under veckor och månader sker på några minuter eller timmar i ett mineralullsisolerat tak. Fuktvariationerna där är snabba och beror av klimatvariationerna under dygnet. Till skillnad mot gasbetongtaket kan man studera fuktbalansen i ett sådant tak under normala förhållanden under ett dygn.

Glaser 1958 a, b, c 1959 utvecklade under slutet av 1950-talet en metod för beräkning av fukttillståndet i konstruktioner med icke hygroskopiska material. Han antog att hela fukttransporten kunde beskrivas av enbart diffusion vilket innebar att t ex kapillärsugning och konvektion försumrades. Fuktflödet är alltså proportionellt mot

ånghaltsgradienten. Uppfuktning och uttorkning av ett tak med sådant material visas i figur 31.

Läge I anger begynnelsetillståndet med torrt material. Eftersom materialet är poröst och icke hygroskopiskt inställer sig snabbt läge IV dvs ånghalten i materialet blir vid tätskiktet $= c_s$ och kondensation startar. Kondenserad vattenmängd beror på lutningen av p-kurvan. Eftersom ingen kapillär återsugning förutsätts förekomma samlas kondensatet vid tätskiktet. Så småningom mättas materialet och kondensationsfronten flyttas neråt i taket.

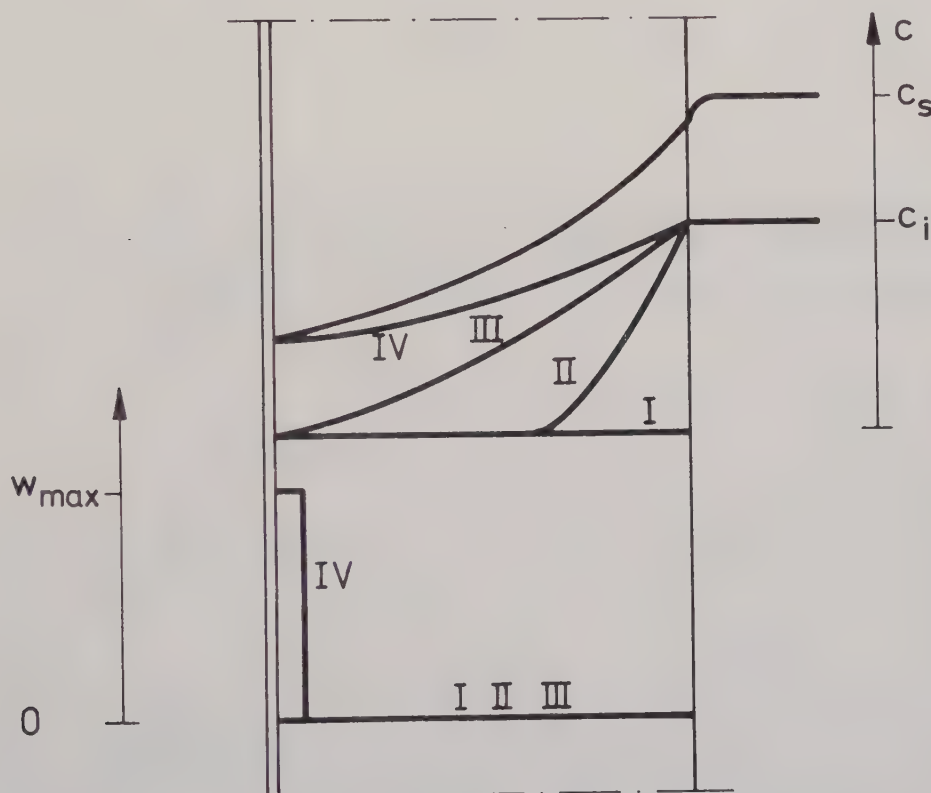


FIG 31. Fuktförhållanden vid olika tidpunkter i ett mineralullsiserat homogent tak.

Det här beskrivna förloppet visar vad som händer i mineralullsisoleringen i taket. Ånghalten på insidan c_i anger tillståndet i plåtkanalen och är alltså beroende av luft- och fuktutbytet mellan inneluft och plåtkanal. Vid ett rikligt sådant utbyte blir c_i lika med ånghalten i inneluften.

Vid uttorkning sker samma sak som vid uttorkningen av ett tak med hygroskopiskt material. Mättnadsånghalten stiger med temperaturen vid tätskiktet så länge som fukthalten är hög och c_s -kurvan får en negativ lutning vilket betyder fukttransport ut genom takets underyta. När allt fritt vatten har förångats och transporterats ut sjunker fukthalten w till i det närmaste noll.

Fukttransporten i taket sker uppåt nattetid då utetemperatur och nattutstrålning sänker tätskiktets temperatur och nedåt under dygnets varma timmar när solen värmer taket. Denna fuktbalans studerar man lättast genom att mäta ånghalten i luften i plåtkanal. Avgivningen blir stor från värmeisoleringen under den varma perioden efter en tid av kondensation och den kan påvisas även om luftutbytet mellan inne-luft och plåtkanal är stort. Fuktbalansen i en plåtkanal beskrivs av figur 32.

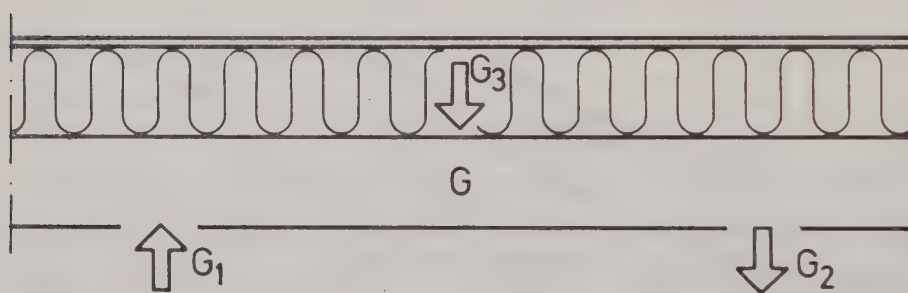


FIG 32. Faktorer som påverkar fuktbalansen i ett plåttak.

Fuktutbytet i plåtkanalerna ges av G_1 , G_2 och G_3 där

$G_1 = c_i \cdot Q$ fukttillskottet från inneluften via springor och hål kg/s

$G_2 = c \cdot Q$ fuktavgivning till inneluften via springor och hål kg/s

$G_3 = g \cdot A$ fuktutbyte med värmeisoleringen kg/s

c_i och c är ånghalt inne och i plåtkanalerna kg/m^3

Q = luftutbyte i springor och hål m^3/s

g = fuktflödestäthet $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

A = den betraktade takytan m^2

Vid $\tau = \tau_0$ är ånghalten i kanalen c_0 . Vid tiden τ har fuktmängden $G \cdot (\tau - \tau_0)$ kg tillförts. Om totala luftvolymen i plåtkanalerna på

den betraktade ytan $A \text{ m}^2$ är $V \text{ m}^3$ kan ånghalten c vid tiden τ skrivas

$$c = c_0 + G \cdot \Delta\tau / V \quad (16)$$

där

$$\Delta\tau = \tau - \tau_0$$

Fuktmängden i kanalen kan skrivas $G = G_1 + G_3 - G_2$ och det kan för-
enklas till

$$c = \frac{c_0 \cdot V + \Delta\tau \cdot c_i \cdot Q + \Delta\tau \cdot g \cdot A}{V + \Delta\tau \cdot Q} \quad (16 A)$$

Ekvationen säger att om Q ökar och $\Delta\tau \cdot Q$ blir stor i förhållande till V och $\Delta\tau \cdot g \cdot A$ blir $c = c_i$. Om g är negativt minskar c , annars ökar c med g . Sambanden kan beskrivas som i figur 33. Under ett dygn med låg utetemperatur och kraftig solstrålning under dagen kan ånghalten i taket variera mellan ett lågt värde på natten till ett högt värde vid middagstid då solstrålningen värmt takytan och ångtransporten g är stor. I figuren förutsätts att luftutbytet med inneluften Q är av normal omfattning.

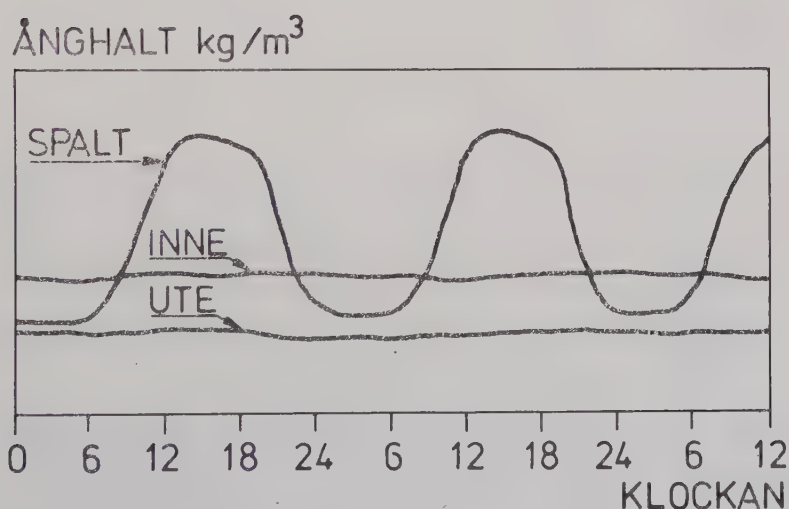


FIG 33. Ånghaltens variation i ett plåttak under ett dygn med kall nattemperatur och solstrålning under dagen. Principfigur.

4.2 FAKTORER SOM INVERKAR PÅ MÄNGDEN KONDENSAT

I fig 33 beskrivs fuktutbytet i plåtkanal. Storheten c beskriver där fuktvariationerna i den del av konstruktionen som ligger ovanför plåten. Denna storhet anger den transportdel som kan orsaka skador och den skall därför något mera belysas. I de fall då mätnadsånghalten vid tätskiktet ligger lägre än ånghalten i plåtkanal kommer transporten av fukt upp i taket att så småningom orsaka kondensation mot tätskiktet. Det är därför intressant att veta dels under vilka betingelser som kondensation är möjlig, dels mängden möjlig kondens.

4.2.1 Skillnad i ånghalt inne - tätskikt

Den drivande kraften för diffusion av vattenånga som beskrivs av ekv (1) är en ånghaltsgradient. Skillnaden i ånghalt mellan luften i plåtkanal och mätnadsånghalten vid tätskiktet anger transportpotentialen.

Mätnadsånghalten vid tätskiktet bestäms av temperaturen på tätskiktet. Denna ges av utetemperaturen, strålning, som kan vara långvågig (nattutstrålning) eller kortvågig (solstrålning), nederbörd i form av regn eller snö, eventuella föroreningar på taket etc.

Ånghalten i plåtkanal bestäms av ånghalten ute, verksamheten inne och plåtens "fuktbromsande" egenskaper. Sambanden sammanfattas i fig 34.

MÄTTNADS- ÅNGHALT TÄTSKIKT

- t_u
- SOLSTRÅLNING
- NATTUTSTRÅLNING
- SNÖ, REGN
- ÖVRIGT

ÅNGHALT I PLÅTKANAL

- c_u
- Δg FUKTTILLSKOTT
- PLÅTEN
- ÖVRIGT

FIG 34. Faktorer som bestämmer ånghaltsskillnaden inne - tätskikt.

Faktorerna som bestämmer mätnadsånghalten vid tätskiktet är kända åtminstone vad gäller lufttemperatur och in- och utstrålning. Meteorologiska data kan hämtas ur Taesler 1972 eller ur Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Instituts årsböcker.

Nederbörden, då främst snö, kan påverka förhållandena på taket. Den delen känner man mindre väl. Mängden snö på mark finns beskriven men uppgifter om snö på byggnader är mera knapphändiga. Holmgren 1968 har gjort en studie av fördelning av snö på tak med hänsyn till olika taklutning. Hans avsikt med studien var att kontrollera om förslagen till dimensionerande snölast var riktiga och han koncentrerade sig därför på snödjup och snöns densitet. En beskrivning av varaktigheten för snö på tak finns inte. En sådan beskrivning är nödvändig för bedömning av kondensationsperiodens längd och risken för skador i taket. Problemet behandlas utförligare i avsnitt 4.2.4 där kondensationsperiodens längd diskuteras.

Regn på tak påverkar ytemperaturen och mätnadsånghalten. Regnet har oftast en lägre temperatur än luften och kyler av ytan. Det mesta regnvattnet rinner av taket men något avdunstar och kyler på så sätt takytan.

Uteluftens ånghalt c_u påverkar ånghalten inomhus. Fukttillskottet Δg från verksamheten inne har studerats vid flera undersökningar och för "normala" förhållanden känner man denna storhet relativt väl. Som exempel kan nämnas följande riktvärden angivna av Sandberg 1973.

	fukttillskott kg/m^3
kontor, bostad, torr industri	0,002
bostad (kök och badrum), halv-	
fuktig industri	0,004
fuktig industri	0,006

För att skatta skillnaden mellan ånghalten i plåtkanalen och mätnadsånghalten vid tätskiktet måste man ta hänsyn till samtliga faktorer. En uppfattning av snöns betydelse för skillnaden i ånghalt inne - tätskikt får man av fig 35. Den visar ånghaltsskillnaden med

och utan snö på tak i Skåne och i Östersund för en bostad eller ett kontor där fukttillskottet Δg är $0,002 \text{ kg/m}^3$. Om utetemperaturen är under noll fungerar snön som värmeisolering. Om utetemperaturen är över noll smälter snön och tätskiktets temperatur kommer att vara konstant ca $\pm 0^\circ \text{C}$. I figuren har antagits att tätskikt som är täckt med snö har temperaturen 0°C och tätskikt utan snö har samma temperatur som uteluften. Figuren visar hur snön påverkar den drivande kraften för fukttransport. Om utetemperaturen är låg höjer snön temperaturen på tätskiktet och skillnaden i ånghalt minskar. Om temperaturen är hög, som under varma vårdagar, orsakar snöns avkylning av tätskiktet en ökad ånghaltsskillnad.

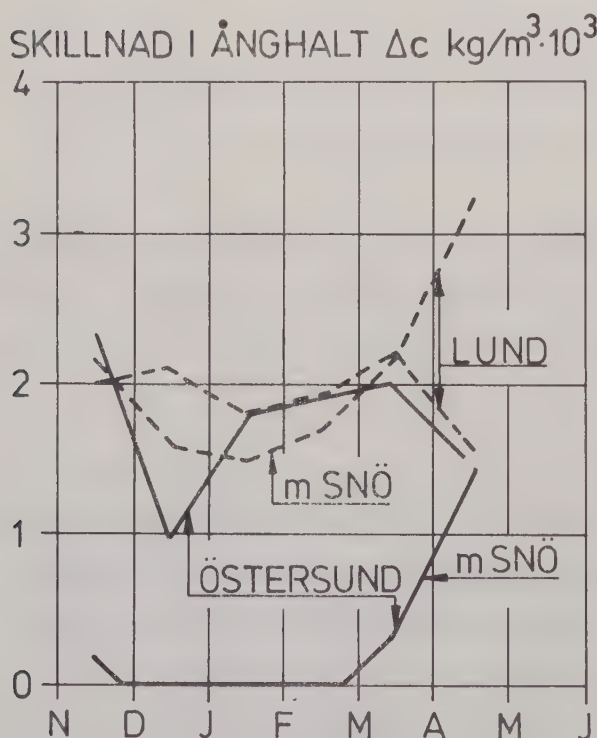


FIG 35. Skillnad i ånghalt inne och mättnadsånghalt vid tätskikt. Exempel för tak med och utan snö på två platser i Sverige. Sambanden gäller för bostad eller kontor med fukttillskottet $0,002 \text{ kg/m}^3$.

Skillnaden i ånghalt Δc är vid inte snötäckt tak konstant ca $0,002 \text{ kg/m}^3$. Δc minskar med utetemperaturen vid snötäckt tak. Det betyder att ånghalts skillnaden påverkas mindre av förekomsten av snö i Sydsverige där

klimatet är mildt än i kallare delar av landet. Man får en positiv effekt av snö först i och med att ånghaltsdifferensen sänks kraftigt.

Det som har sagts om positiva och negativa effekter gäller enbart relationen till ånghaltsdifferensen. Övriga effekter av snö på tak diskuteras senare.

4.2.2 Plåtens förmåga att hindra luftgenomgång

Tidigare har visats att skarvar och hål och en tryckskillnad över plåten kan ge luftrörelser upp i taket och en ånghalt i plåtkanalen som beror av inneluftens ånghalt. Om hålen tätas effektivt, eller om det inte finns någon lufttrycksskillnad, saknas förutsättningar för fuktkonvektion. I så fall fungerar plåten som en effektiv ångspärr och fuktspärr. Att så inte är fallet i normala konstruktioner. visar bl a fältmätningarna i avsnitt 5.

Luftutbyte genom skarvar och hål medför också fuktutbyte. Tryckdifferensen över plåtspalten styr luftflödet och därmed också fuktmängden som tillförs. Om takkonstruktionen är utförd så att tätskiktet är helt luft- och vattentätt kan luften inte blåsa genom taket. Men trots att taket som helhet är lufttätt kan det uppstå en liten tryckskillnad över plåten som kan ge luftrörelser upp genom plåtskarven. Denna tryckskillnad är beroende av byggnadens storlek, ev rumsindelning, fläktplacering etc. Storleken kan variera inom vida gränser men av fältmätningarna som redovisas senare framgår att ett tryck av ca 2 - 3 Pa är ett rimligt medelvärde.

Tryckskillnaden 2 - 3 Pa orsakar ett luft- och fuktutbyte. Luftflödet Q blir ca $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ enligt figur 5. Luften är fuktig och ger ett fukttillskott som beskrivs i figur 32. Fukttillskottets storlek är beroende av ånghalten c_i i plåtkanalen. Maximalt fukttillskott inträffar när all tillförd fukt genast transporteras upp mot tätskiktet och kondenserar. Då beskriver skillnaden $c_i - c_s$ fukttillskottet.

För ett boningshus eller ett kontor är fukttillskottet $c_i - c_u$ och även $c_i - c_s$ ca $2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ om förhållandena inte är extrema (kraftig solinstrålning eller kraftig nattutstrålning eller nederbörd

eller snö på taket). Fuktutbytet $G_1 - G_2$ per meter kan tecknas:

$$\Delta c \cdot Q \quad (5 \text{ a})$$

som med de aktuella värdena insatta blir

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ kg/s} \cdot \text{m}$$

- Antag som exempel att luftläckaget sker vid plåtarnas ändöverlapp
- och att luften transporteras längs profilerna i spalten. Då skall
- den ovan beräknade fuktmängden fördelas på en stor yta. Spaltlängden
- vid överlappet är p g a profileringen längre än plåtens täckande
- bredd. Om skarven i den övre flänsen borträknas eftersom den inte
- kommer att medverka vid luftinläckning p g a att värmeisoleringen
- klistras mot profiltopparna, blir den relativa skarvlängden 1,58 av
- täckande bredd för en normalt profilerad plåt. Avståndet till nästa
- skarv är normalt ca 10 m dvs fukttillskottet till takytan blir:

$$\frac{2 \cdot 1,58}{10} \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 0,32 \cdot 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

- Detta tillskott bör jämföras med den fuktmängd som vid låg utetempe-
- ratur och i övrigt lika förhållanden kan transporteras från plåtka-
- nalen upp genom värmeisoleringsmaterialet.

- Transporterad fuktmängd kan approximeras med

$$g = \frac{c_i - c_s}{z_{\text{isolering}}} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \quad (1 \text{ d})$$

- Approximationen innebär att tätskiktet antas fullständigt tätt och
- ogenomsläppligt för vattenånga.

- Vid en tjocklek h hos värmeisoleringen av 100 mm och vid antagandet att
- $c_i - c_s = 2 \cdot 10^{-3}$ fås följande värden:

	fuktutbyte g kg/m ² · s
stenull	$2,4 \cdot 10^{-7}$
glasull	$2,2 \cdot 10^{-7}$
styrencellplast	$0,12 \cdot 10^{-7}$
kork	$0,2 \cdot 10^{-7}$

Fukten som transporteras in via plåtskarvar kommer under kalla perioder att vandra vidare upp i värmeisoleringen. Exemplet ovan visar att vid "normala" fuktmängder ångtransporten genom de porösa värmeisoleringarna är så stor att fukten fortsätter direkt mot takytan. För de mera ångtäta materialen kommer ånghalten i spalten att öka och närma sig ånghalten inomhus. Om springan i plåtöverlappet skiljer sig från det här antagna eller om tryckskillnaden avviker från det "normala" fallet 2 - 3 Pa kommer även ånghalten i plåtkanalerna att ändras.

4.2.3 Isolermaterialets och klisterskiktets fuktegenskaper

Fukttransporten från plåtkanalerna upp mot tätskiktet och tillbaka bestäms av egenskaperna hos materialen ovanför plåten. Olika värmeisoleringar har olika fuktegenskaper, vilket framgår bl a av tabell 1 i avsnitt 3.2.1. Klisterskiktet mellan plåt och värmeisolering påverkar också transporten upp mot tätskiktet. Den vanligaste klistermetoden innebär att både plåtens profiltoppar och värmeisoleringens undersida strykes med varm asfalt innan skivorna läggs på. Hela undersidan av värmeisoleringen har då ett ångbromsande skikt. Fuktegenskaperna hos detta skikt kan emellertid vara svåra att bedöma. Olika material absorberar olika mycket asfalt vilket påverkar det färdiga skiktets genomsläpplighet för ånga. Mängden asfalt kan också variera mellan olika klistertillfällen beroende på hur asfalten appliceras. Asfaltens temperatur har också stor betydelse för inträngningen i isolerskivan och därmed också för fuktegenskaperna.

För att få en uppfattning om ångmotståndet hos klisterskiktet på normala isoleringar har ett antal prover tillverkats enligt figur 36. Skivorna har bestрукits med varm asfalt på en arbetsplats och från samma skiva har 3 prover tagits ut. Proven togs ut enligt följande. Ett togs från den flödiggast bestrukna delen av skivan I, ett från den delen som hade minst asfalt II, och slutligen ett från den del som bedömdes ha medelmängd asfalt III.

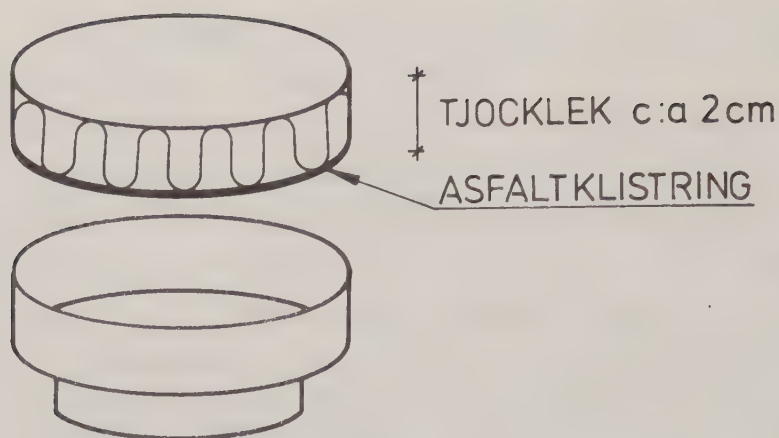


FIG 36. Klisterskiktets ångmotstånd på olika värmeisoleringsmaterial provade enligt wet-cupmetoden. Den asfaltbestrukna delen av provet ligger ner mot skålen.

Ånggenomsläppligheten för klisterskiktet + ca 2 cm av värmeisoleringsmaterial anges i m/s. Värdet bör jämföras med värdet för ångspärr av PE-folie som är av storleken $1 - 3 \cdot 10^{-6}$ m/s.

TABELL 4. Ånggenomsläppligheten $\frac{1}{z}$ m/s för klisterskiktet. Skiktet består av ca 2 cm isoleringsmaterial bestruket med varm asfalt. Värdena är multiplicerade med en faktor 10^{-6} .

	I	II	III
glasull	27	96	81
stenull	3	13	9
kork	4	11	8

Tabellen visar att en välgjord klistring på stenull och kork ger en god ångbroms. Glasull däremot adsorberar lättare den varma asfalten och klisterskiktet blir mera poröst och mera genomsläppligt.

4.2.4 Kondensationsperiodens längd

Den sista faktorn som bestämmer mängden kondensat i ett plåttak är kondensationsperiodens längd. Om förhållandena är sådana att kondensatet ackumuleras i taket kan stora mängder fukt lagras. Detta är fallet vid långa perioder av kyla men även vid perioder med snö på tak. Snön fungerar då temperaturutjämnande så att tätskiktet har ungefär

samma temperatur under hela kondensationsperioden. Om utetemperaturen är låg blir temperaturen på takytan beroende av snöskiktets tjocklek. Vid tjockt snötäcke kan snöns värmeisolerande förmåga medföra att nollisotermen faller i gränsskiktet dvs att smältning sker vid takytan. Är snötjockleken mindre blir ytans temperatur lägre än noll men högre än uteluftens. Om å andra sidan utetemperaturen är över noll blir temperaturen vid ytan lika med noll så länge det finns snö kvar på taket.

Förutsättningen för kondensation av inifrån kommande fukt är en mättnadsånghalt vid tätskiktet som är lägre än ånghalten i inneluften. Om tätskiktet tillfälligt värms upp av t ex solstrålning smälter fruset kondensat och mättnadsånghalten höjs och kondensatet kan transporteras nedåt i taket. Är denna uppvärmning tillräckligt kraftig kan taket torka ut, i annat fall sker bara en omfördelning av fukt i taket.

Kondensationsperiodens längd T_k kan beskrivas som en funktion av ånghaltspotentialen. T_k är den tid då ånghalten inne c_i ständigt är högre än mättnadsånghalten vid tätskiktet c_s .

$$T_k = f(c_i, c_s) \quad (17)$$

Mättnadsånghalten vid tätskiktet, c_s , är beroende av utetemperaturen, strålningsförhållanden och eventuellt snö eller regn på taket.

$$T_k = f(c_i, t_y, \text{nederbörd}) \quad (17 \text{ a})$$

t_y anger yttemperatur med hänsyn tagen till förutom temperaturen även långvågig och kortvågig strålning.

För att kunna bedöma mängden kondensat i taket är det viktigt att känna storheten T_k . Den bestäms dels av verksamheten inne i lokalen och av fuktproduktionen där, dels av klimatet utanför huset. Effekten av nederbörd är den del som är minst känd. Det finns mycket lite underlag för bedömning av t ex snövaraktighet på tak med olika taklutning i områden med olika snöbelastning.

I det följande görs ett försök att bestämma effekten av uteklimatet på T_k . Dels görs en statistisk sammanställning av utetemperaturens variation dels görs en teoretisk beräkning av snövaraktighet på tak.

Utetemperatur

Ur Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Instituts årsböcker har temperaturuppgifter hämtats rörande köldperioders varaktighet och antal. Två tidsperioder har studerats dels åren 1960 - 1969 dels åren 1940 - 1942. Den första perioden har valts för att den är den senaste 10-årsperioden den andra har valts för att den innehåller några extremt kalla vintrar. Den andra perioden är med för att kontrollera hur erhållna klimatdata från 1960 - 69 ligger jämfört med data från extrema år.

Ur datamaterialet har hämtats dels antal frystillfällen/år dels frysperiodens längd. Frysperioden mäts i dagar och definieras som den tid då utetemperaturen alltid är under noll. Resultatet från klimatstationer fördelade över hela landet visas i tabell 5 nedan.

TABELL 5. Utetemperaturens varaktighet under noll för olika platser i Sverige. Tabellen förklaras på nästa sida.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Jokkmokk	60-69	6,1	4,3	2,0	126	132	15	152	110
Gällivare	40-42	9,5	9,0	3,5	57	141	14	155	128
Luleå	63-69	5,5	2,5	1,4	59	118	14	147	93
Östersund	60-69	6,0	3,2	0,7	73	99	16	122	59
Östersund	41-42	7,0	3	1	36	100	12	115	74
Härnösand	60-69	4,6	2,1	0,6	64	70	15	113	45
Härnösand	40-42	6,5	4,5	1,5	47	85	11	115	49
Falun	63-69	4,6	2,0	0,8	61	80	11	106	55
Karlstad	60-69	4,5	1,6	0,5	57	63	12	93	33
Karlstad	41-42	7	3	1	43	60	8	87	33
Stockholm	60-69	3,9	1,6	0,5	48	60	11	88	29
Stockholm	40-42	7	2,5	1,5	55	75	10	106	28
Jönköping	60-69	3,2	1,5	0,3	38	51	11	82	23
Jönköping	41-42	6	2	1	54	52	7	77	26
Göteborg	60-69	2,1	1,0	0,3	28	33	9	67	12
Göteborg	40-42	4,5	2,5	1,0	33	49	7	70	16
Malmö	60-69	2,2	0,4	0,1	29	30	9	70	6
Malmö	40-42	4,0	2,5	1,0	33	46	7	68	14

De olika kolumnerna i tabell 5 har följande betydelse.

- 1 Klimatstation. Platsen har valts för att få representativa värden för hela regionen.
- 2 Observationstid. Uppgifter saknas för hela mätperioden för vissa orter. Därför skiljer sig i vissa fall observationsperioderna från de avsedda 1960 - 69 och 1940 - 42.
- 3 Antal gånger/år i medeltal som frysperioden, dvs då utetemperaturen är under noll, varit 5 dygn eller längre.
- 4 Antal gånger/år som frysperioden varit 10 dygn eller längre.
- 5 Antal gånger/år som frysperioden varit 20 dygn eller längre.
- 6 Den under observationstiden uppmätta längsta frysperioden.
- 7 Totala antalet frysdagar/år i medeltal.
- 8 Antal frystillfällen/år i medeltal.
- 9 Maximalt antal frysdagar/år under mättiden.
- 10 Minimalt antal frysdagar/år under mättiden.

Tabell 5 ger uppgifter om sannolikheten för långa köldperioder. Frysperioder som är 20 dagar eller längre förekommer 1 - 2 gånger per år i norra Norrland, 1 gång vartannat år i mellersta Sverige, en gång vart tredje år i Sydsverige utom Skåne och i Skåne förekommer de bara ca en gång vart tionde år. Totala antalet frysdagar per år är över 100 i Norrlands inland, 50 - 100 i Mellansverige och mindre än 50 i Sydsverige.

Om man antar att den dimensionerande frysperioden skall uppträda 3 - 4 gånger på tio år får man följande uppskattning av T_k

Jokkmokk	45
Östersund	31
Härnösand	31
Karlstad	20
Stockholm	30
Göteborg	20
Malmö	15

Snö på tak

Det finns ett omfattande om än inte helt tillförlitligt observationsmaterial för snö på mark och det finns studier av snö på tak med olika lutning, men det saknas en för de här beskrivna undersökningarna så viktig uppgift som snöns varaktighet på tak.

För att få en uppfattning om hur lång snöperiod man räknar med på tak i olika delar av landet har därför ett datorprogram konstruerats. Det beskrives i det följande.

Snöbalans på tak

En beskrivning av programmet för beräkning av snövaraktighet på tak kräver kunskap om ingående variabler. Därför beskrives först följande element som styr snöbalansen.

snöfall

solstrålning

konvektion

regn med temperatur > 0

värme underifrån

Nederbörd kan falla som regn eller som snö. Vilket det blir bestäms i huvudsak av lufttemperaturen. Snökristallerna bildas i högre luftlager.

På små kondensationskärnor i luften fälls vattenånga ut och det bildas kristaller. Kristallernas form bestäms av sambandet mellan temperatur vid kondensation och övermättnadsgraden. Kristallformen bestämmer också snöns egenskaper som densitet, vattenkvarhållningsförmåga, kapillaritet osv. Om det blåser samtidigt som det snöar packas snön hårt i vindutsatt läge förutsatt att den inte blåser bort, medan den läggs löst i läområden. Densiteten hos nyfallen snö med lika kristallstruktur kan alltså variera avsevärt.

Antalet olika snökristalltyper framgår av figur 37 som är hämtad från Mellor 1964 a. Kristallerna bildas vid olika temperaturer och vid olika övermättnadsgrad vilket visas i figur 38 som är hämtad ur samma källa. Klassificeringen är gjord av Nakaya 1954.

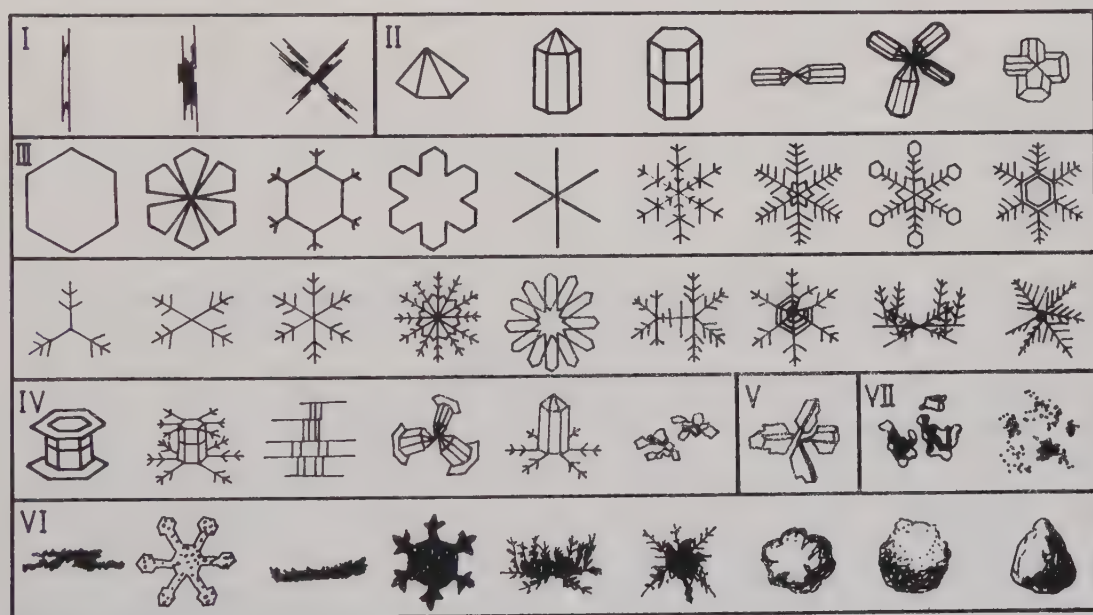


FIG 37. Allmän klassificering av snökristaller. Siffrorna i de olika kristallgrupperna hänvisar till figur 38.

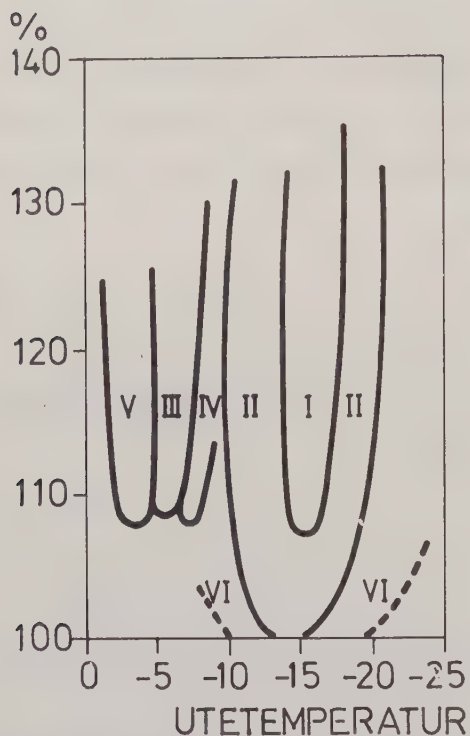


FIG 38. Samband mellan utetemperatur och övermättnadsgrad för att olika kristalltyper skall bildas. Jämför med figur 37.

Övermättnadsgraden s definieras som

$$s = \frac{w + \rho'}{\rho_0}$$

där

w = luftens vatteninnehåll kg/m^3

ρ' = vattenångans mättnadsdensitet över underkylt vatten kg/m^3

ρ_0 = vattenångans densitet över is kg/m^3

När snön smälter förändras kristallerna, de klumpar ihop sig och växer och då ändras också snöns egenskaper. Finkornig nysnö har hög

vattenkvarhållningsförmåga medan blöt grovkornig snö över ca 500 kg/m^3 inte kan absorbera och hålla mer vatten. Om snön smälter vid ytan kan det där bildas ett begränsat skikt med högre densitet som, om det återfryser, bildar ett islager i snötäcket. Snön har sällan jämn densitet över hela tjockleken utan är skiktad. Om man skär ett vertikalt snitt genom snön ser man de olika skikten uppdelade efter packningsgrad, kornstruktur, densitet.

Förhållanden som har med smältning och vattenavrinning att göra beror av snöns egenskaper och dessa varierar alltså inom vida gränser.

Många faktorer påverkar avsmältningen. De viktigaste är solstrålning, konvektion och värme underifrån.

Av solstrålning som faller mot snön reflekteras den största delen, resten transmittas genom snön och absorberas. Nysnö och gammal snö har olika reflexionstal. Nyfallen snö kan ha reflexionstal, albedo, på upp till 0,95 och blöt grovkornig snö kan ha albedo 0,5 eller lägre. Ett vanligt värde på albedo för ny snö är 0,8. Värdena är hämtade ut Bader et al 1939. Snön transmittar strålning intill ett djup av ca 50 cm. Figur 39 ur Bader et al 1939 visar hur mycket av den icke reflekterade strålningen som transmittas till olika djup av snön.

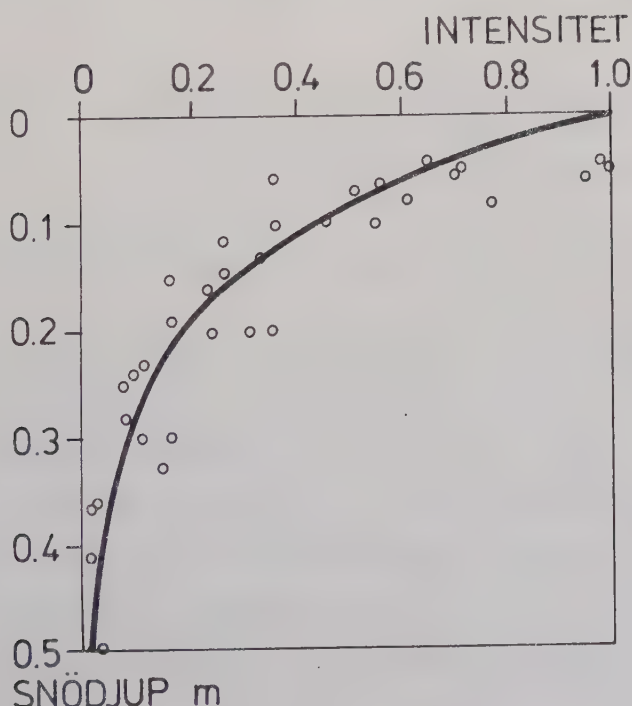


FIG 39. Solstrålningens absorption i snö. Figuren anger hur den icke reflekterade strålningen transmittas och absorberas.

Den mesta strålningen reflekteras. Resten absorberas av snön eller, om snötäcket inte är tillräckligt tjockt, av underlaget takytan. När snön smälter ändras kristallstrukturen, ytans albedo minskar och smältningen accelereras. Själva smältningsprocessen ändrar förutsättningar för omvandling av snön.

Om himlen inte är helt klar minskas strålningen genom absorption och reflexion i molnen. En helt molntäckt himmel ger dock ett strålningsbidrag genom indirekt, kortvågig strålning. Figur 40 som är hämtad ur Scott 1964 visar molntäckets effekt på strålningen.

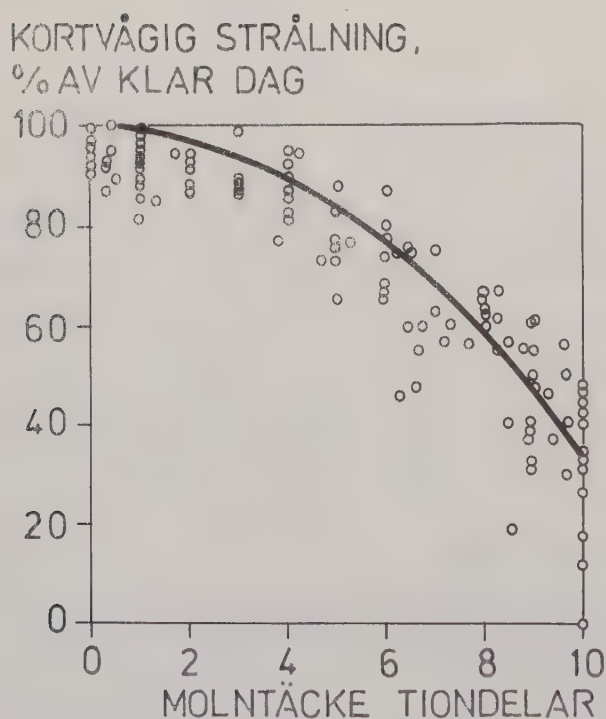


FIG 40. Molntäckets effekt på den infallande kortvågiga strålningen.

Om lufttemperaturen stiger över noll sker ett värmeutbyte i ytan och snön smälter. Värmeflödets storlek är beroende dels av temperaturen dels av värmeövergångstalet. Detta senare är bl a beroende av vindhastigheten över ytan. Vattnet som frigörs vid smältning uppfifrån kan antingen fukta ner bara ett begränsat snöskikt och bilda horisontella lager med högre densitet som beskrivits tidigare eller leta sig väg ner genom snön och till sist hamna på takytan och eventuellt rinna bort.

Beskrivning av programmet för beräkning av snö på horisontella tak

Avsikten med programmet är att beräkna snömängd och varaktighet av snö på tak. Resultatet skall användas för byggnadsfysikaliska bedömningar av effekten av snö på tak och inte i första hand för beräkning av snölaster.

Utetemperatur

Utetemperaturen beskrivs med en dygnsmedeltemperatur. Denna beräknas med utgångspunkt från dygnsmedelvärdena under åren 1931 - 1960 ovanpå vilka normala variationer i dygnsmedeltemperaturerna har lagts. I figur 41 visas medeltemperaturerna för orterna Lund, Stockholm och Gällivare. Figur 42 anger hur stora medelvariationerna i dygnstemperatur är för de tre orterna.

I programmet ansätts en sinuskurva för medeltemperaturen, figur 41.

$$\bar{t} = A + B \cdot \sin \left(2\pi \frac{\tau + 90}{360} \right)$$

där τ = tiden i dagar

Tiden väljes så att beräkningen startar den 1 juli och avslutas 30 juni. Medeltemperaturen har maximum vid $\tau = 0$ och minimum vid $\tau = 180$.

Medelavvikelseerna figur 42 antas följa följande samband.

$$\overline{\Delta t} = C + D \cdot \sin \left(2\pi \frac{\tau + 120}{360} \right)$$

Medelavvikelseerna antas ha sitt maximum i månad 6 dvs vid $\tau = 330$ och minimum i månad 12 dvs $\tau = 150$.

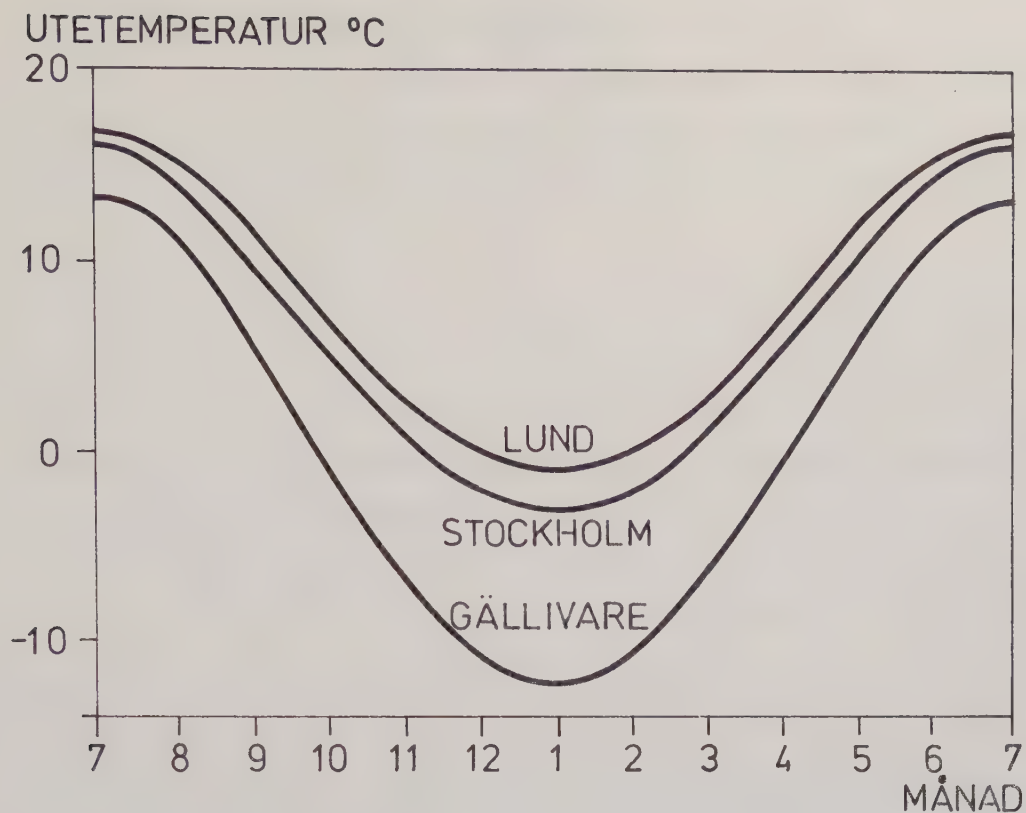


FIG 41. Dygnsmedeltemperatur för tre olika orter i Sverige.
Enligt Taesler 1972.

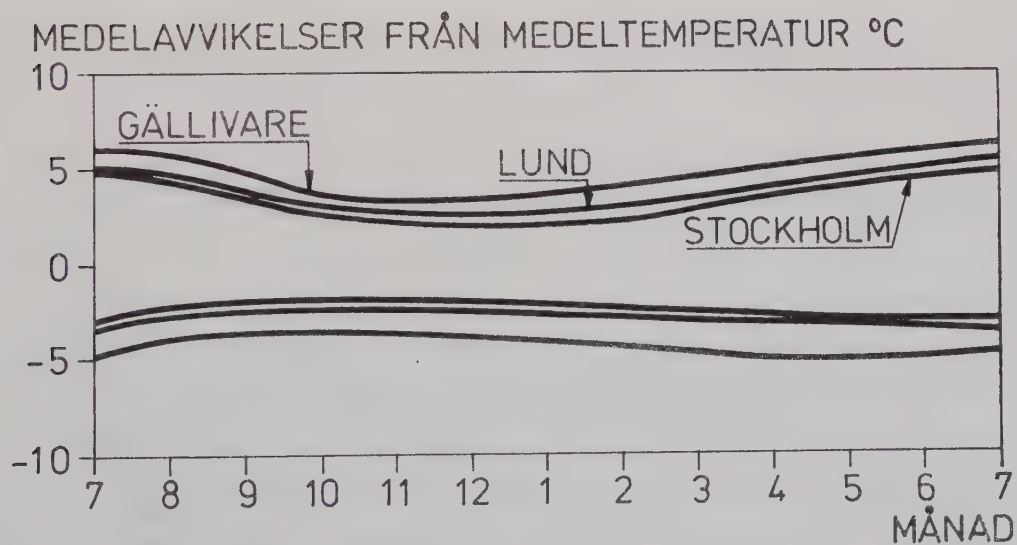


FIG 42. Högsta och lägsta dygnsmedeltemperatur räknat från medeltemperaturen i fig 41. Enligt Taesler 1972.

Konstanterna A, B, C och D väljes så att kurvorna får god överensstämmelse med de verkliga temperaturvariationerna.

Snötäckets tjocklek påverkas av förekomsten av snöfall och av avsmältning.

Snöfall

Taesler 1972 ger uppgifter på dygnsmedelvärden av nederbördsmängder månad för månad. Man kan också få fram sannolikheten för nederbörd under en viss dag. Med dessa värden i programmet kan man simulera nederbörd dag för dag. I programmet antas snö vid utetemperaturer lägre än eller lika med noll och regn annars.

Snön som faller antas ha densiteten 100 kg/m^3 . Efterhand som den smälter ökar densiteten. Hela snötäcket antas ha samma densitet rakt igenom men nysnön ligger lös ovanpå den övriga snön och ökar inte sin densitet förrän smältning har förekommit. Om det blåser mer än Beaufort 4 ($=6 - 8 \text{ m/s}$) antas att all nysnö blåser av taket. Antagandet är naturligtvis en förenkling eftersom det förutsätter att hela taket ligger utsatt för vind. Så är inte fallet på vanliga tak där fläkthus, överbyggnader och andra detaljer ger läzoner.

Sol

Solstrålningen ger värmetillskott som kan smälta snö. Vid en instrålad energimängd av 1000 Wh/m^2 kan mängden snö S_s smältas.

Av strålningen antas att 80% reflekteras. Då återstår

$$0,2 \times 1000 \times 3600 \text{ J/m}^2$$

Isens smältvärme är $3,33 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$, dvs mängden S kan smälta

$$S = \frac{7,2 \cdot 10^5}{3,3 \cdot 10^5} = 2,16 \text{ kg/m}^2$$

Strålningsintensitetens variation under året är sinusformad och därför kan maximal avsmältning S_s p g a sol ges följande uttryck

$$S_s = 2,16 \left(E - F \cdot \sin \left(2\pi \frac{\tau + 270}{360} \right) \right)$$

Konstanterna D och F väljs så att avsmältningen motsvarar verklig solavsmältning.

Tiden τ mäts i dagar.

Konvektion

I beräkningen antas värmeövergångstalet $\alpha = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Då får man en avsmältning S_k p g a konvektion som blir

$$S_k = 8 \cdot 3600 \cdot 24/3,33 \cdot 10^5 = 2,1 \text{ kg/m}^2\text{K dygn}$$

Regn

Värmetillskottet vid regn är måttligt. För att höja temperaturen hos 1 kg vatten 1 °C krävs 4180 J. Vid avkylning av 1 kg regnvatten 1 °C frigörs alltså så mycket värme att snömängden S_r kan smälta.

$$S_r = 4180/3,33 \cdot 10^5 = 0,013 \text{ kg/m}^2\text{K}$$

Regnet ökar vattenmängden hos snön. Om densiteten överstiger 500 kg/m³ antas att överskottsvattnet avrinner.

Avsmältning underifrån

Snö på tak innebär extra värmeisolering. Nysnö har goda värmeisoleringssegenskaper medan blöt, gammal snö har ett λ -värde som närmar sig vattnets eller isens. Så länge det finns snö kvar på taket kommer takytans temperatur att vara högre än utetemperaturen åtminstone så länge utetemperaturen är under noll. När utetemperaturen stiger förblir takytans temperatur noll medan snön smälter. Om utetemperaturen är tillräckligt låg blir temperaturen vid takytan lägre än noll. Villkoret för att smältning vid tätskiktet inte skall inträffa är att utetemperaturen är lägre än en kritisk temperatur t_{krit} som beror av takets värmemotstånd, snöns värmemotstånd och snötäckets tjocklek.

För enkelhetens skull antas oförändrat λ -värde för snön trots att densiteten varierar. Som rimligt värde väljs $\lambda = 0,15 \text{ W/m.K}$ vilket motsvarar en densitet av ca $200 - 400 \text{ kg/m}^3$. Av figur 43 framgår att även värmeledningsegenskaperna varierar kraftigt och att spridningen är stor.

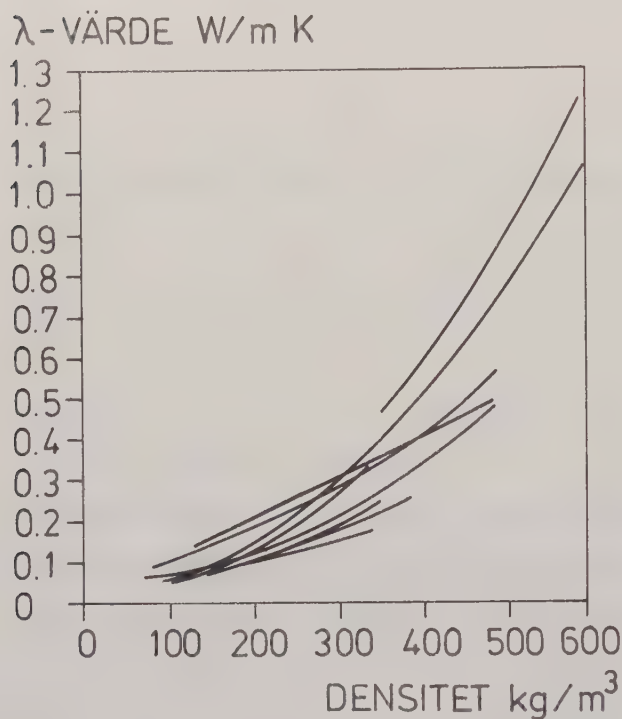


FIG 43. Värmeledningstalets λ variation med snöns densitet. Efter Mellor 1964 b.

Den kritiska temperaturen kan beräknas. Takets värmemotstånd är $M \text{ m}^2\text{K/W}$, övergångsmotstånden är m_i och m_u , snöns tjocklek $d \text{ m}$ och λ -värdet $0,15$.

Innetemperaturen är 20°C och utetemperaturen varierar. t är temperaturen i gränsen mellan taket och snön.

$$t = 20 - \frac{m_i + M}{m_i + m_u + M + \frac{d}{0,15}} \cdot (20 - t_u)$$

Sättes $t = 0$ får man den kritiska temperaturen för utetemperaturen

$$t_{\text{krit}} = - \frac{0,8 + 133 \cdot d}{0,13 + M}$$

där m_i och m_u har fått värdena $0,13$ och $0,04$ resp.

I programmet testas först om utetemperaturen understiger detta värde. Om den inte gör det kommer snön att smälta i gränsytan mot taket. Värmen som tillförs beror av takets värmeisolering. Detta värme smälter snön i det gamla snötäcket. Om ny snö har fallit ovanpå gammal snö antas att den nya snön inte påverkas.

Antag att värmeflödet genom taket är $k \cdot \Delta t \text{ W/m}^2$. Temperaturskillnaden Δt sätts till 20°C . Per dygn tillförs värme som kan smälta snömängden S_u .

$$S_u = k \cdot 20 \cdot 3600 \cdot 24/3,33 \cdot 10^5 = 5,2 \cdot k \text{ kg/m}^2, \text{ dygn}$$

Konstanter

I tabellen nedan anges de konstanter som använts för programmet. Konstanterna anges för platserna Lund, Stockholm och Gällivare. Platserna har valts för att få stor geografisk spridning.

TABELL 7. Konstanter för beräkning av snö på tak. Konstanterna finns beskrivna var för sig tidigare.

		Lund	Stockholm	Gällivare
Utetemperatur- konstanter	A	7,5	6,0	0,5
	B	8,5	9,0	12,5
	C	3,75	3,5	4,5
	D	1,3	1,4	1,5
Solstrålnings- konstanter	E	1,88	1,78	1,62
	F	1,68	1,68	1,68
Sannolikhet för nederbörd		0,5	0,55	0,5
Medelnederbörd/dygn mm		1,7	1,3	1,0
Sannolikhet för klar dag		0,13	0,13	0,13
Sannolikhet för vind 6 m/s		0,23	0,23	0,20
Takets värmegenomgångstal		Valfritt		

Resultat

Figurerna 45 - 47 är exempel på resultatutskrifter för olika platser.

Där anges dels snödjup på mark och snödjup på tak med $k = 0,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ under en vintersäsong dels utetemperaturens variation under året. Beräkningen av snö på mark sker med samma program. Där antas dock inte vinden påverka snödjupet. Inte heller smälter snön p g a värme underifrån. I figur 44 visas uppmätt snödjup på mark på de tre platserna.

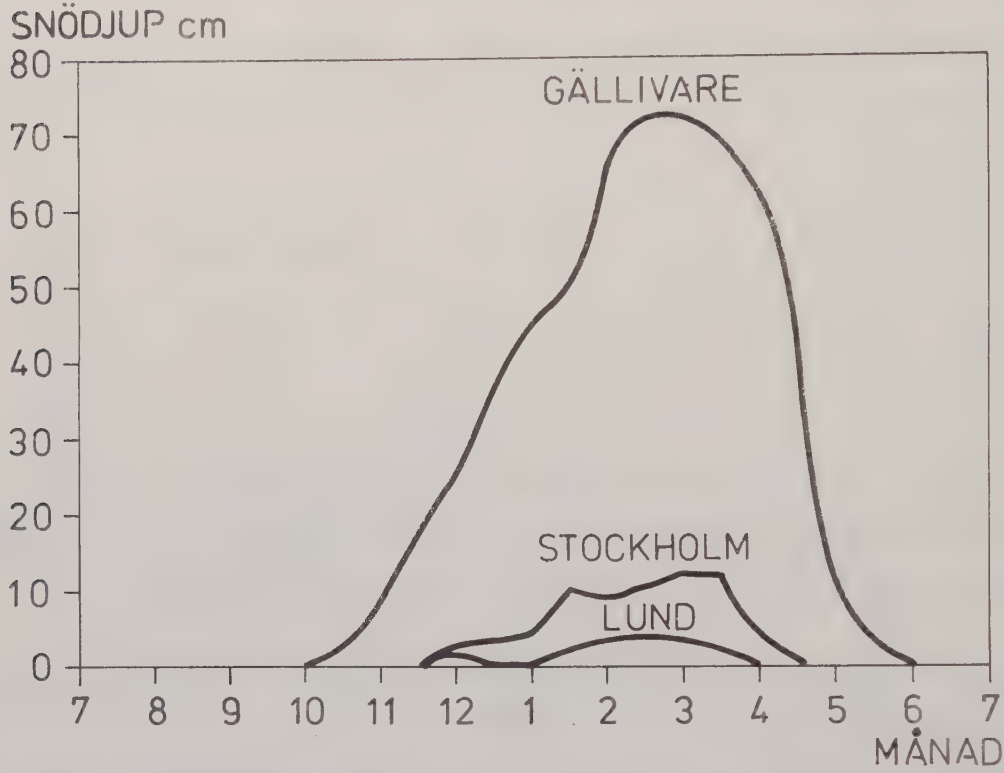


FIG 44. Snödjup på mark i olika delar av landet. Medelvärden under 30 år hämtade från Taesler 1972.

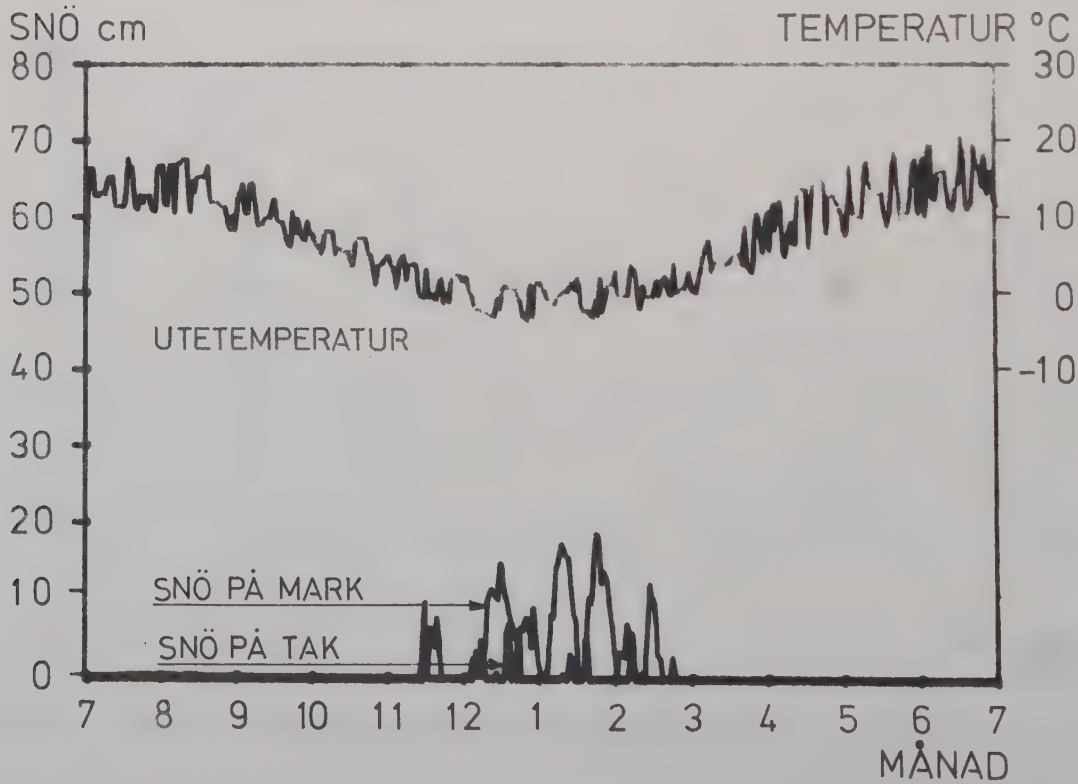


FIG 45. Snö på mark och på tak i Lund. Beräknade värden. Övre kurvan avser dygnsmedeltemperatur.

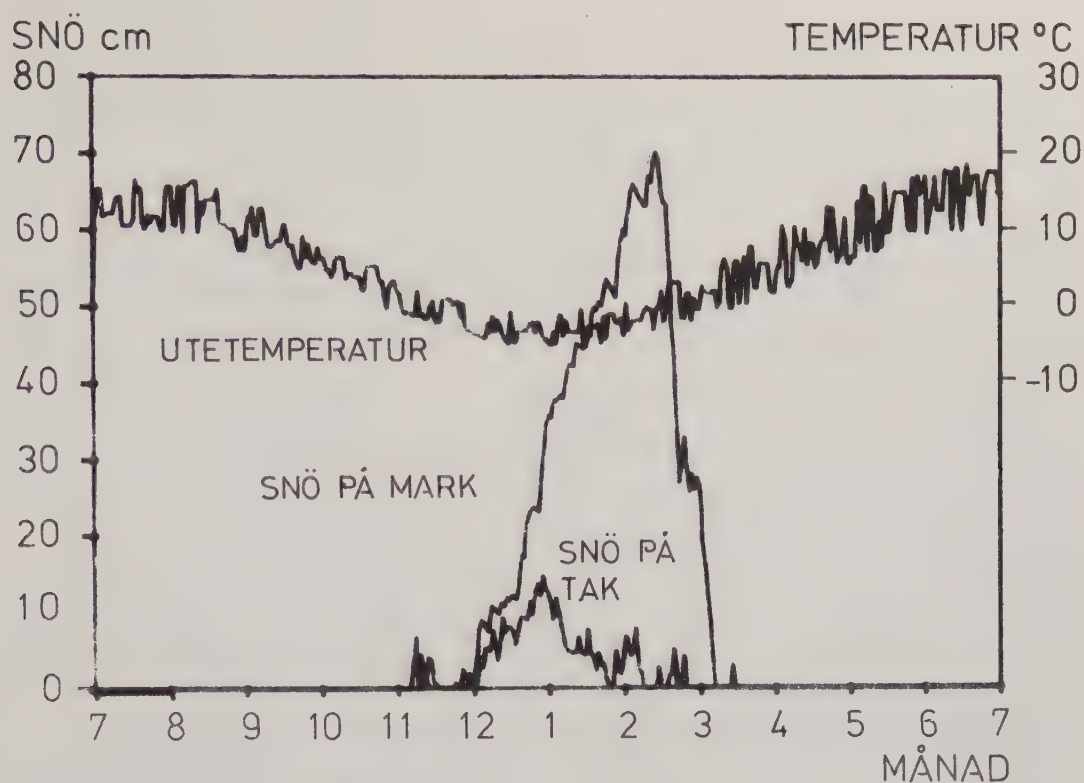


FIG 46. Snö på mark och på tak. Stockholm. Beräknade värden. Övre kurvan avser dygnsmedeltemperatur.

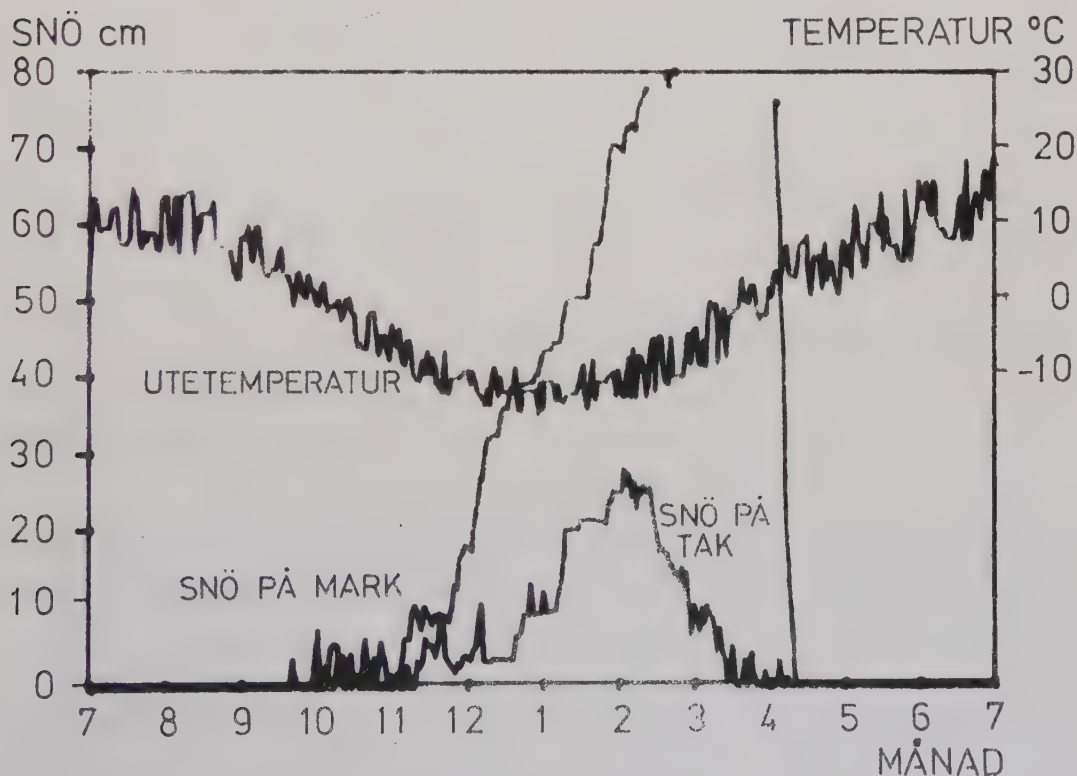


FIG 47. Snö på mark och på tak. Gällivare. Beräknade värden. Övre kurvan avser dygnsmedeltemperatur.

Resultaten visar en stor skillnad i varaktighet av snö på tak i olika delar av landet. Detta var kanske väntat. Genom att upprepa beräkningarna för snövaraktigheten får man en uppfattning om den dimensionerande kondensationsperioden T_k p g a snö.

TABELL 8. Dimensionerande snövaraktighet i dygn med upprepningstid dels 1 år dels 5 år. Värdena har beräknats genom simulering i dator och gäller för tak med $k = 0,3$.

	1 gång/år	1 gång/5 år
Lund	10	15
Stockholm	40	70
Gällivare	100	140

Dimensionerande kondensationstid

Av det tidigare framgår att den dimensionerande kondensationstiden T_k varierar avsevärt över landet. I sydligaste Sverige är frysperioden längst men i övriga landet dimensionerar snövaraktigheten. En mycket grov uppskattning av kondensationsperiodens T_k längd är:

Sydligaste Sverige och kustområdena.	10 - 30 dagar
Det inre av sydsverige, Svealand, södra Norrlands kustland	30 - 80 dagar
Övriga Norrland	80 - 150 dagar

4.3 KONSEKVENSER AV FUKTVARIATIONERNA I TAKET.

De här beskrivna fuktvariationerna i det utvändigt isolerade plåttaket kan naturligtvis inverka på takets funktion. Som inledningsvis nämnades har några skadefall visat att man kan få fuktskador. De är dessbättre sällsynta. Nedan redogöres för de olika skadetyper som är aktuella.

4.3.1 Dropp

Det mest påtagliga synliga beviset på fukt i plåttak är att det efter en lång kondensationperiod droppar vatten från takets undersida. Orsaken till dropp har ovan berörts. Kondenserat vatten eller is i värmeisolering och i springor mellan värmeisoleringsskivor rinner ner genom takkonstruktionen vid ett hastigt väderomslag. Via skarvar och överlapp mellan plåtar rinner vattnet ner i lokalen under.

Vissa lokaler har en verksamhet som kräver att dropp inte får förekomma. Där måste man förhindra kondensation i sådan omfattning att den kan ge upphov till dropp. I allmänhet orsakar dropp endast estetiska problem. Då kan man acceptera att det droppar från taket t ex någon gång per år. I andra fall kan man anordna en invändig vattenavledning i rännor för att ta hand om oönskat kondensvatten.

4.3.2 Värmeisoleringsförsämring

En allvarligare konsekvens än dropp är den värmeisoleringsförsämring som följer vid nedfuktning av värmeisoleringsmaterialet. Värmeledningsegenskaperna ändras då fukthalten i materialet ändras. Värmeisoleringsförsämringen är dock inte så påtaglig som dropp. Ett tak kan ha försämrad värmeisolering utan att det märks annat än på ökade uppvärmningskostnader.

Jespersen 1952 har studerat hur olika materials värmeledningstal förändras vid varierande fukthalt. Han har studerat material av liknande typ som de som används för takisolering. Den mineralull han mätte på har dock avsevärt lägre volymvikt än den som används till tak. I figuren 48 nedan visas mätningar på några olika material enligt Jespersen 1952.

I figuren anges hur vatteninnehållet påverkar värmeledningstalet λ . Inverkan är störst för mineralull som får en mycket kraftig värmeisoleringsförsämring redan vid så lågt fukttinnehåll som 1 vol-%. För kork och cellplast är försämringen direkt proportionell mot fukthalten.

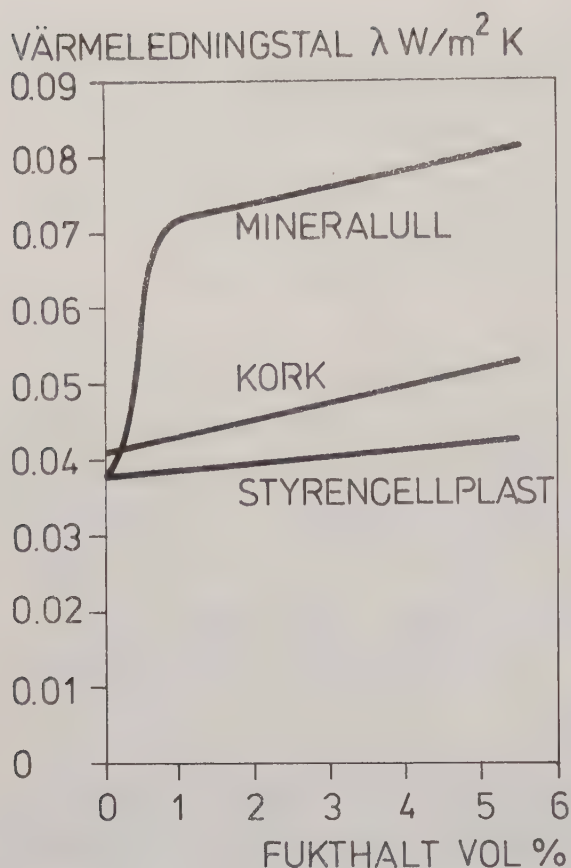
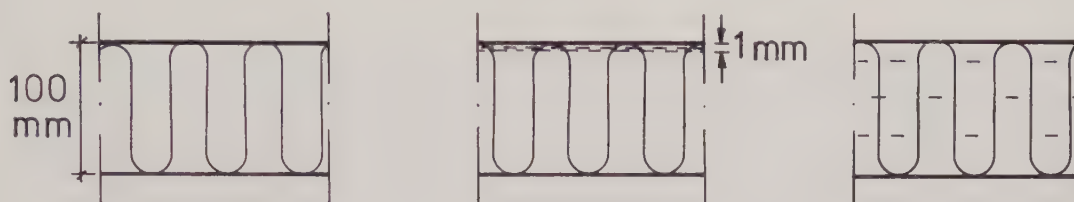


FIG 48. Värmeledningstalets förändring med fukthalten för olika värmeisoleringsmaterial. Enligt Jespersen. Materialen har följande volymvikter: mineralull 78 kg/m³, kork 150 kg/m³, styrencellplast 20 kg/m³.

Sambandet är något förvånande. Den kraftiga värmeisoleringsförsämringen för mineralull kanske härrör från ett mätfel av samma art som diskuteras i avsnitt 3.2.4. Där visades att mätfelet kan ha samma storleksordning som λ -värdeshöjningen.

I vilket fall påverkar förekomsten av fukt materialets λ -värde. När isoleringen fuktas ner av kondensvatten ändras värmeledningsegenskaperna. Om kondensfukten samlas vid tätskiktet och lagras som en tunn vattenfilm blir den fuktiga delen av värmeisoleringen liten. Å andra sidan blir fukthalten där mycket hög. Men om kondensfukten drivs tillbaka ner i taket av tyngdkraften, av kapillär sugkraft eller av annan kraft kan fukten omfördelas så att isoleringsförsämringen blir större.

- I följande exempel visas hur en och samma vattenmängd 1 kg/m^2 i ett
- tak med 10 cm mineralullsisolering kan fördelas olika i taket och
- på så sätt kan ge helt olika värmeflöden. Värden på värmelednings-
- talet λ har hämtats från Jespersen 1952. Antag först helt torrt mate-
- rial. Då är värmemotståndet $d/\lambda = 2,6$ och $\Lambda = 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$. Om vattnet
- antas koncentrerat till ett skikt med tjockleken 1 mm fås $\Sigma d/\lambda \approx 2,6$
- och $\Lambda = 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ men om vattnet antas jämnt fördelat i materialet
- så att mineralullen får fukthalten 1 volym % blir $d/\lambda = 1,4$ och
- $\Lambda = 0,72$



- FIG 49. Hypotetiskt exempel på fuktens inverkan på värmegenomgången i ett mineralullsisolerat tak. I första fallet antas helt torrt tak, i det andra fallet att fuktmängden 1 kg/m^2 är koncentrerad vid tätskiktet och i sista fallet att fuktmängden är jämnt fördelad i isoleringen. Om materialet antas värmeisoleringsförsämrat enligt Jespersen 1952 får man följande värmegenomgång: $\Lambda = 0,38$; $0,38$ och $0,72$ resp.

4.3.3 Nedbrytning av material eller förändring av vidhäftning p g a upprepad nedfuktning, frysning etc

Närvaro av vatten vid tätskiktet kan orsaka andra skador än försämring av värmeisoleringsförmågan. Finns det stora mängder vatten kan man tänka sig någon av följande nedbrytningsmekanismer.

frysning
fuktnedbrytning
urlakning

I material med tät sluten struktur kan frysning orsaka skador. Så är fallet i t ex styrencellplast. Upprepad frysning kan ge brott i materialet, så att tätskiktet mister sin förankring. I mineralull är en sådan förstörelsemekanism tänkbar först vid stora fuktmängder.

I organiska material som kork kan fukten bidra till angrepp av biologisk art. Svampar och insekter kräver fukt för sin existens men kan i allmänhet leva vidare utan stora tillskott. Korken som normalt används på tak är impregnerad med asfalt och risken för t ex röta är liten. Om fukten finns i materialet en längre tid kan korken emellertid förstöras.

Den tredje typen av förstöring är urlakning av mineralull. Materialet består av tunna mineralfibertrådar som hålls samman med bindemedel. Om materialet blir fuktigt kan förbindelsen mellan bindemedel och fibrer påverkas och materialet hålls inte ihop. Denna förstöring är inte aktuell på de material som nu används men vid övergång till nya typer bör man känna till att fukthalten kommer att variera och att materialet blir fuktigt.

Den nedbrytning som kan ske i isoleringsmaterialen kan också ske i klisterskiktet. Det idag vanligaste klistret är varm asfalt. Det påverkas inte nämnvärt av fukt. Nya material på plast- och gummibas kräver andra klistermetoder och limtyper. Man skall därför välja fukttåliga material som inte ändrar sina egenskaper vid en upprepade nedfuktning.

5 MÄTNINGAR

I detta avsnitt redovisas mätningar som gjorts i fält och laboratorium i avsikt att kartlägga fuktbalansen i ett plåttak och att beskriva de olika materialens egenskaper.

5.1 FÄLTMÄTNINGAR

Syftet med mätningarna på tak över byggnader som är i bruk har varit att påvisa de fuktvariationer som har beskrivits i avsnitt 4.1. För att kunna beskriva fuktvandringen på ett riktigt sätt krävs kännedom om följande:

- klimatet utomhus
- klimatet i plåtkanalen
- klimatet inomhus
- lufttrycksskillnader över plåten

Utomhusklimatet skall ge information om dels temperaturen på tätskiktet dels vattenånghalten i utomhusluften. Klimatet mellan plåt och värmeisolering studeras för att man i variationerna i luftens ånghalt skall kunna dra slutsatser om fuktrörelserna i taket. Klimatet inomhus ger upplysningar om fukttillskottet vid verksamheten inne. Lufttrycksskillnaden över plåten anger den drivande kraften för lufttransport genom springor och hål.

Mätningarna har efter ett antal förstudier förenklats till att omfatta endast de nämnda variablerna. Dessa är tillräckliga för att beskriva fuktbalansen i plåttaket.

5.1.1 Mätmetoder

I figur 50 visas var i taket mätningarna har skett.

t_u och ϕ_u avser temperatur och relativ ånghalt ute. t_y är temperaturen på takytan, t_s och ϕ_s är temperatur och relativ ånghalt i plåtkanalen och t_i och ϕ_i är temperatur och ånghalt inomhus. Vid några av mät-

ningarna gjordes bestämningar av t_s och ϕ_s i flera kanaler. Detta gjordes för att studera eventuella skillnader i t_s och ϕ_s p g a olika hålareor på olika delar av plåten.

Temperaturen mättes med termoelement koppar-konstantan, relativ ånghalt med fuktgivare Hygrodynamic 15-2011 med normalt mätområde 25 - 90% RF, lufttryck med Micromanometer MDC med mät huvud -25 - +25 Pa. Alla mätvärden registrerades på en 24-punktskrivare Philips Multipoint Recorder PR 3500. Anledningen till att datainsamlingen skedde på punktskrivare och inte på datalog med hålremsa var att skrivaren ger möjlighet att under mätningens gång kontrollera förloppet och då välja rätt längd på mätperioden.

Efteråt har mätvärdena bearbetats i dator och luftens ånghalt beräknats i de olika mätpunkterna. Ånghalterna ute, inne och i spalten har sedan jämförts i diagram av den typ som visas i figur 33.

Som en komplettering till klimatmätningarna har i några fall fukthalhalten i isoleringen bestämts. Detta har skett så att ett provstycke av tätskikt + isolering med en storlek av ca 20 x 20 cm² har skurits loss från taket, förseglats i plastpåse och transporterats till laboratorium. Där har sedan provet vägts, torkats och vägts igen. Sedan har fukthalten bestämts.

5.1.2 Mätobjekt

Efter de första inledande studierna av fuktbalans i plåttak visade det sig lämpligt att välja mätperioder med stor variation i utomhusklimatet. Om utetemperaturen varierar mellan minusgrader på natten och flera plusgrader på dagen och kraftig solstrålning kan fuktvariationer i luften i plåtkanalerna konstateras.

Sådant klimat uppträder vanligtvis under vårvintern. I Skåne är dock även under denna tid temperaturen ganska konstant och skiljer sig föga mellan dag och natt p g a dis och dimma. I mellansverige och norra Sverige kan förhållandena vara mera gynnsamma. Därför har en stor del av fältmätningarna koncentrerats till ett område runt Sundsvall där klimatet var lämpligt vid de aktuella mätperioderna mars -72 och mars -73.

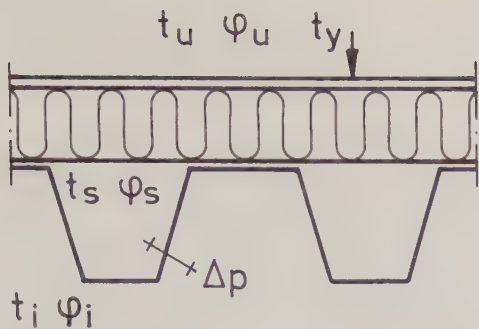


FIG 50. Mätpunkternas läge vid fältmätningar.

Urvalet av mätobjekt är således inte slumpmässigt utan har styrts av kravet på gott klimat.

Av tabellen nedan framgår vilken typ av lokaler och takkonstruktioner som har ingått i undersökningen.

TABELL 9. De i fältmätningarna ingående mätobjekten och deras konstruktioner.

Plats	Verksamhet	Konstruktion
Malmö	Butikslokal	Papp + 50 kork + profil 90
Eslöv	Produktion cellplast	Papp + 50 mineralull + profil 90
Helsingborg	Produktion el-material	Papp + 50 mineralull + profil 45 perforerad
Helsingborg	Reservdelslager	Papp + 50 mineralull + profil 90
Kristianstad	Ishall	Papp + 50 mineralull + profil 45
Sundsvall	Lager, livsmedel	Papp + 70 kork + profil 45
Sundsvall	Lager, ost	Papp + 70 kork + profil 45
Sundsvall	Lager, frukt	Papp + 80 mineralull + profil 45
Sundsvall	Bensinmack	Papp + 80 cellplast + profil 90
Sundsvall	Spolhall	Papp + 80 mineralull + ångspärr + + profil 90, perforerad
Östersund	Strumpfabrik	Papp + 80 mineralull + ångspärr + + profil 90
Sundsvall	Sågverk	Papp + 80 mineralull + profil 90
Eskilstuna	Datacentral	Plåt + 100 mineralull + ångspärr + + profil 90
Eskilstuna	Tryckeri	Papp + 70 mineralull + profil 45
Norberg	Butikslokal	Plåt + 80 mineralull + profil 45
Örnsköldsvik	Kontorslokal	Plåt + 100 mineralull + ångspärr + + profil 45
Västerås	Kontorslokal	Papp + 80 mineralull + profil 45



FIG 51. Mätobjektens läge i landet.

Verksamheten i lokalerna har valts för att få så stor spridning som möjligt. Bland de undersökta objekten finns lokaler med mycket hög fuktproduktion såsom tryckeri, strumpfabrik och produktionslokal för cellplast, lokaler med befuktad luft såsom datacentral och kontor, lokaler med tillfälligt höga fukthalter såsom spolhall, sågverk och ishall samt lokaler med normal eller liten fuktproduktion såsom butiker, kontor och lager.

Konstruktionen har också varierats. Tre av objekten hade rostfri plåt som tätskikt, övriga papp. Den vanligaste värmeisoleringen var stenull men även andra material fanns: 1 tak med cellplast, 1 tak med glasull och tre tak med kork. Tjockleken hos värmeisoleringen har varierat beroende på läget i landet från 50 till 100 mm. I fyra fall hade konstruktionerna ångspärr och i två fall var den bärande plåten perforerad.

Profilhöjden var i de flesta fall 45 eller 90 mm.

5.1.3 Mättid

Mätningarna har pågått hösten-vintern 1971, våren 1972, våren 1973 och våren 1975. Hösten-vintern 1971 gjordes försöksmätningar på objekt 1. Vid dessa mätningar visade det sig att klimatet i Malmö vid denna tid inte var lämpligt. Efter en kontroll av relevanta mät-punkter beslöts därför att de följande mätningarna skulle förläggas till våren, och till platser med större variation i utetemperatur.

Vid varje mätobjekt pågick mätningen ca 1 dygn. Om klimatet under denna tid varierade kraftigt kunde fuktvariationer i plåttaket på-visas. Om resultatet på punktskrivaren visade intressanta ändringar fortsatte mätningen ännu ett dygn eller mera.

5.1.4 Mätresultat

Resultaten från mätningarna har samlats i diagramform. I dessa anges relativa ånghalter, temperaturer samt absoluta ånghalter i luften. För några objekt anges även mätt fukthalt i värmeisoleringen.

I det följande finns resultaten från samtliga fältmätningar samlade i diagramform objekt för objekt.

Den bästa informationen om fuktbalansen i taket får man av ånghalts-, diagrammet. Där kan man avläsa hur fukttillskott från värmeisole-ringen under soluppvärmning av tätskiktet höjer ånghalten i spalten eller hur ånghalten sänks vid låg utetemperatur då fukten vandrar upp mot tätskiktet. Hela tiden måste man dock jämföra ånghalterna med temperaturerna för att få en riktig bild av vad som händer. Samva-riationen mellan ånghalten inne och i spalten påvisar ett fuktutbyte genom skarvar och hål.

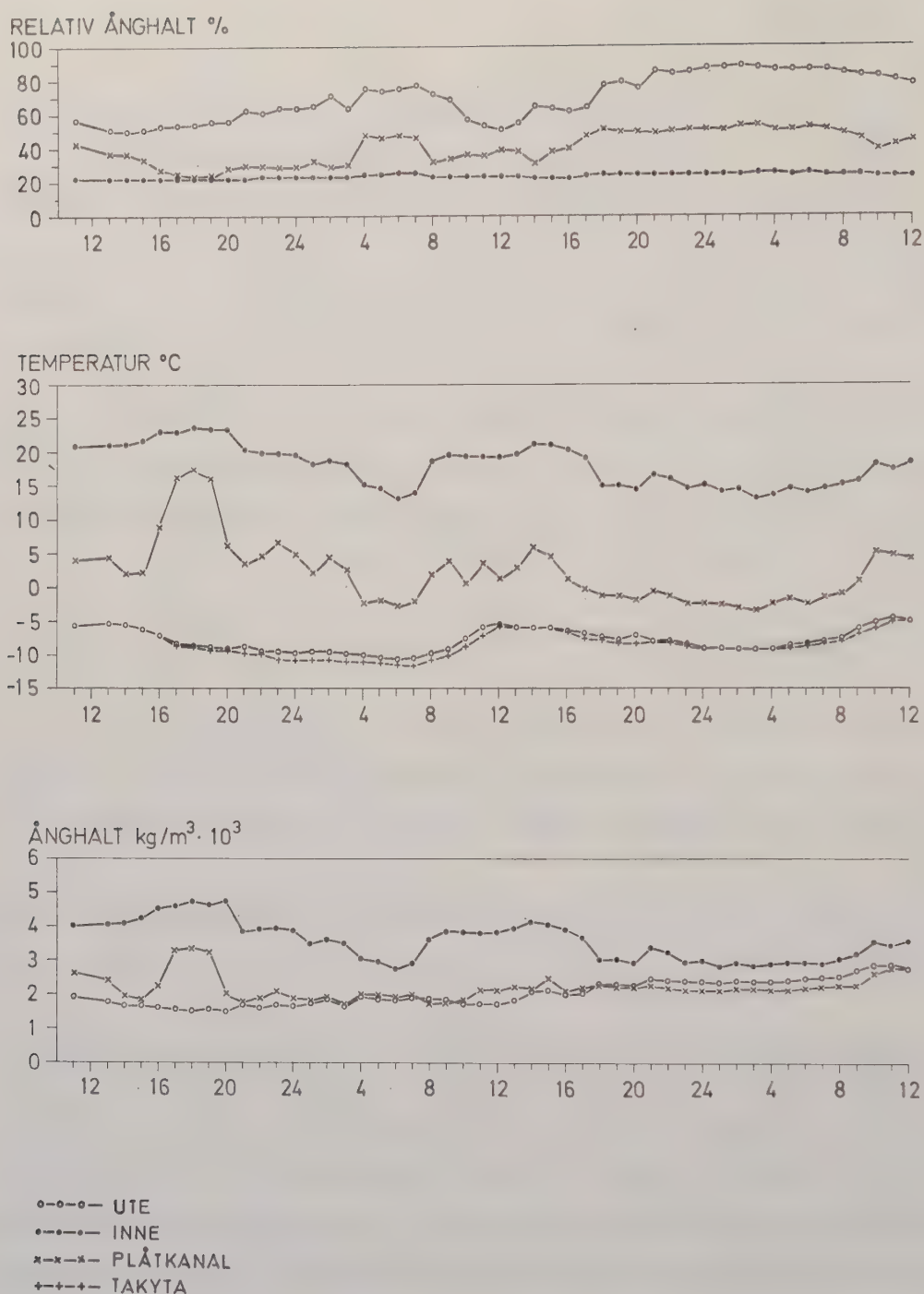
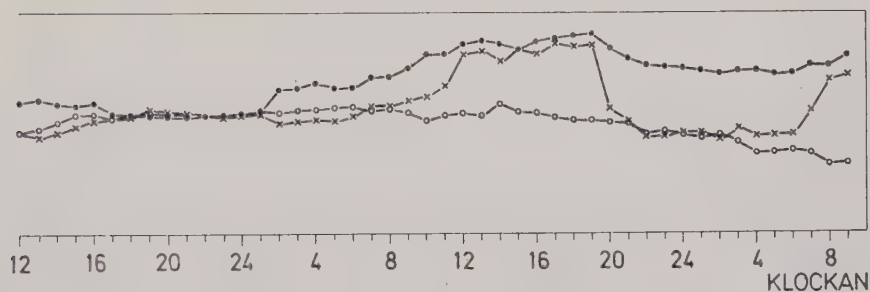
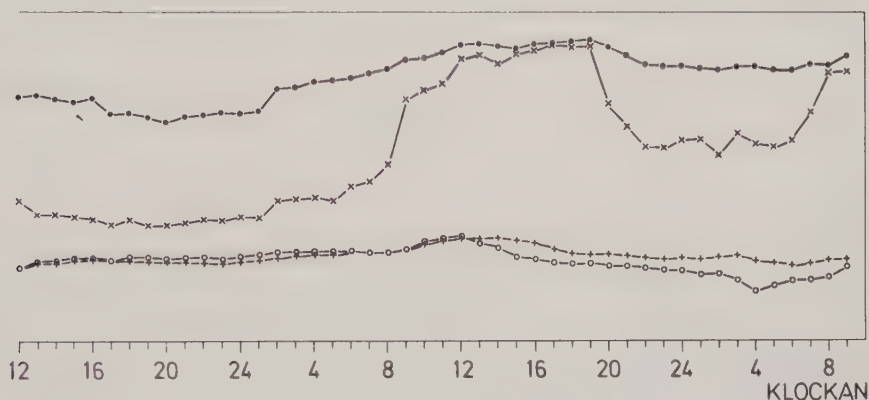
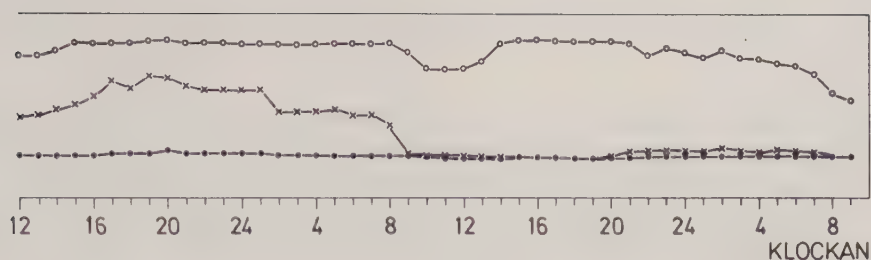


FIG 52. Mätobjekt 1. Butikslokal Malmö. 1972-01-29--02-02.
 Konstruktion: papp + 50 mm kork + profil 90 mm.

Ånghalten inne varierar och verkar inte bero enbart av uteluftens ånghalt. Vid vissa tillfällen är ånghaltsskillnaden 3 g/m^3 och vid andra är den noll. Ånghalten i plåtkanal är för det mesta lika med uteluftens men vid vissa tillfällen ökar den. Temperaturkurvan ger svar på vad som händer.

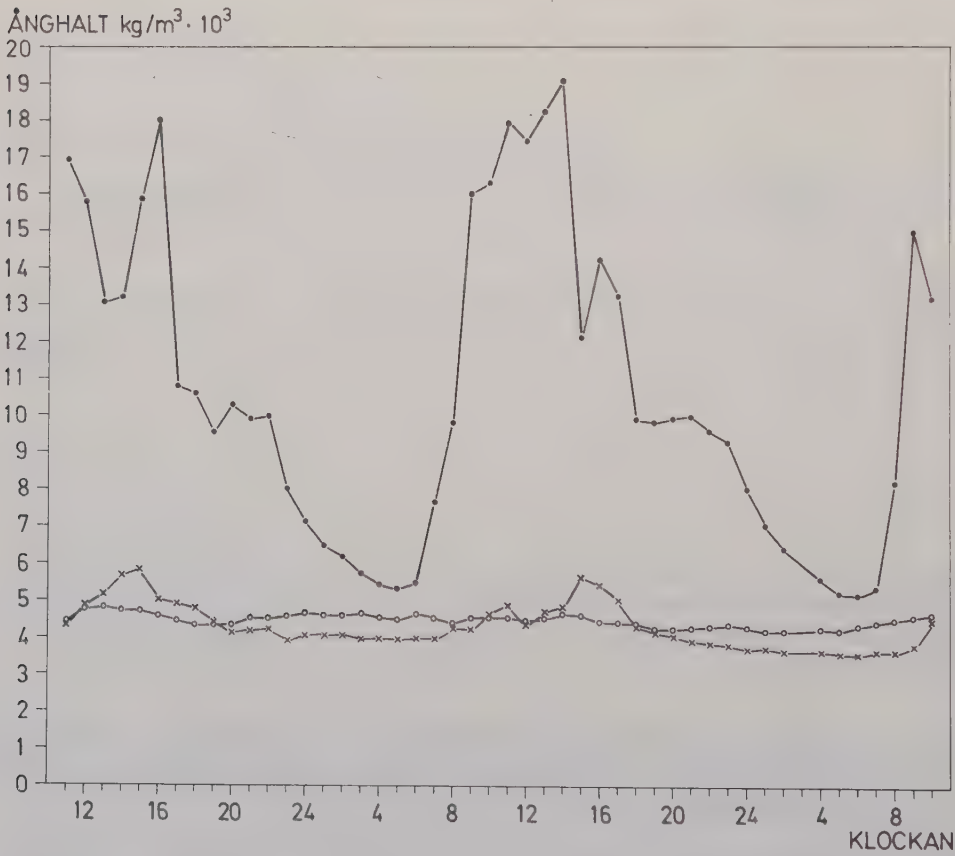
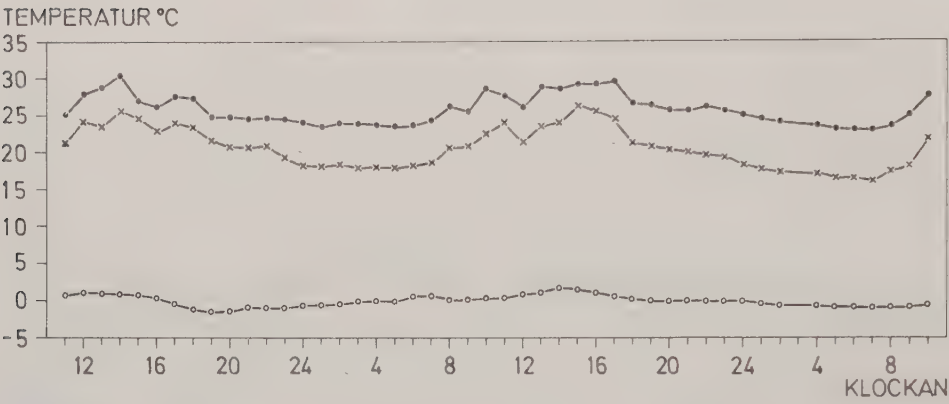
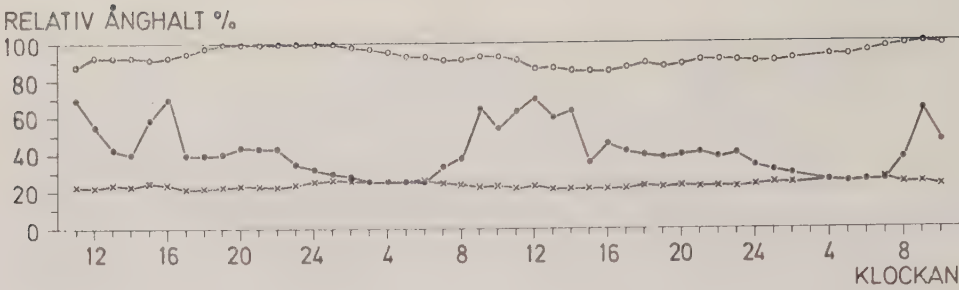


Plåtkanalens står i förbindelse med uteluften. Nattetid och ibland även under dagtid varierar temperaturen med uteluften. Om plåtkanalens inte stått i förbindelse med uteluften hade temperaturen där varit nästan lika med inneluften. Så är det alltså inte här.

Vid vissa tillfällen, nämligen då lokalens fläktsystem är igång, ökar emellertid temperatur och ånghalt i kanalen. Detta visar att inneluften vid det invändiga övertryck som skapas, genast vandrar upp i taket.

Ånghaltskurvorna ger inte någon indikation på att det förekommer fuktutbyte med korken.

Under hela mättiden har det varit disigt och mulet.



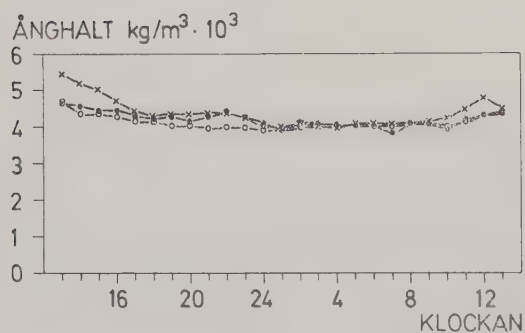
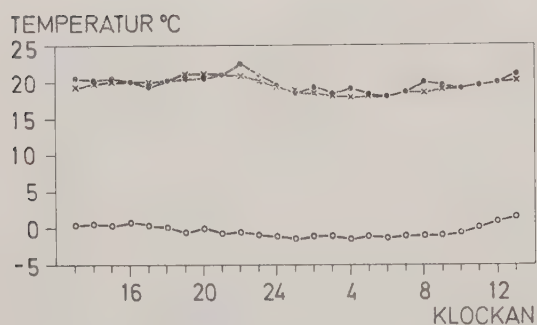
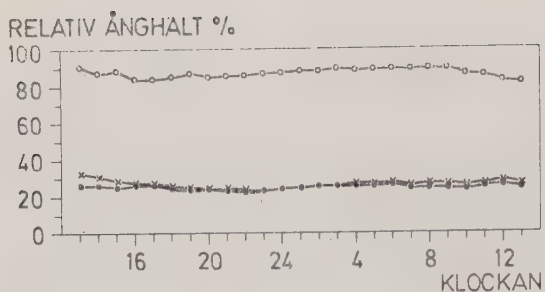
○-○-○ UTE
●-●-● INNE
x-x-x PLÅTKANAL

FIG 53. Mätobjekt 2. Produktionslokal för cellplast. Eslöv
1972-02-08--10. Konstruktion: papp + 50 mm mineralull +
+ profil 90 mm.

I anslutning till produktionslokalen ligger ett lager. Taket ansluter till väggen på lagret så att plåtkanalerna mynnar utan tätning mot lagerlokalen. Produktionen av cellplast skapar undertryck. Detta undertryck orsakar luftflöde från lagret via taket in i lokalen. Denna luft är något kallare än inneluften men den är mycket torrare, i själva verket har den uteluftens ånghalt.

Med andra tryckförhållanden hade den höga ånghalten inne kunnat skapa problem i taket. Nu fungerar det bra trots att det saknar varje form av fuktskydd.

Under hela mättiden har det varit mulet.



○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 x-x-x- PLÅTKANAL

FIG 54. Mätobjekt 3. Produktionslokal Helsingborg 1972-02-15--16.
 Konstruktion: papp + 50 mm mineralull + 45 mm perforerad plåt.

Fukttillskottet av verksamheten inne är lågt. Trots detta ser man antydningar till ånghaltsvariationer i plåtkanalen, variationer som har en dygnsfrekvens. Vid middagstid varje dag har ånghalten i plåtkanalen maximum för att under resten av dygnet väl följa inneluftens.

Under hela mätningen var det mulet.

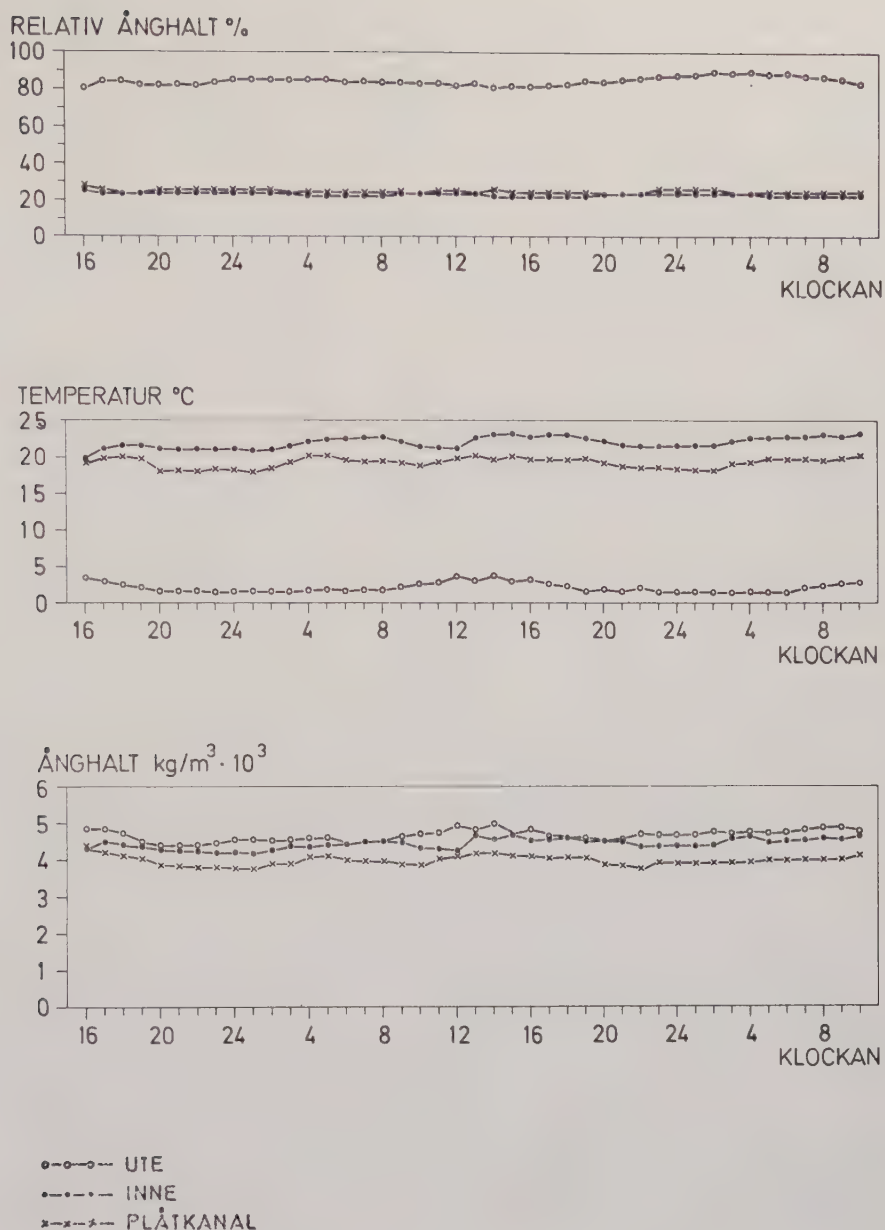
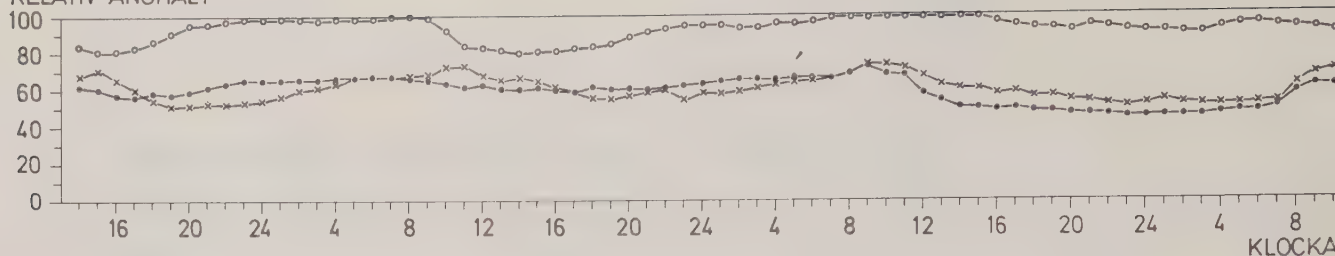


FIG 55. Mätobjekt 4. Reservdelslager Helsingborg. 1972-02-16--18.
Konstruktion: papp + 50 mm mineralull + 90 mm plåt.

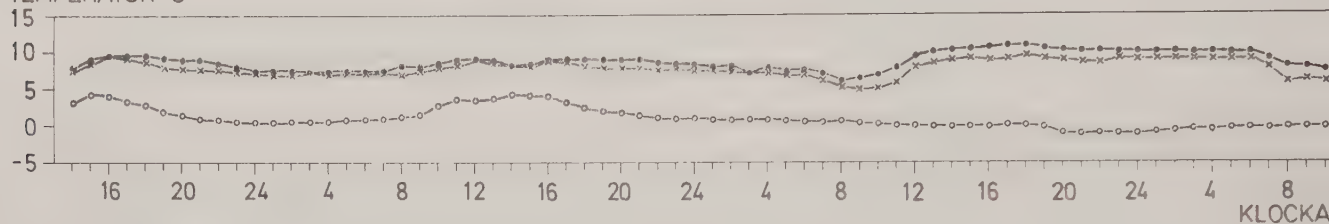
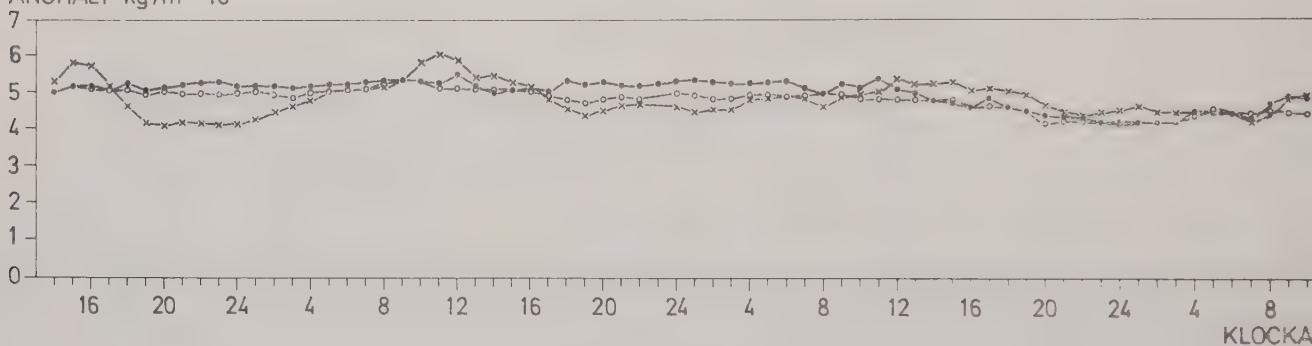
Mätningen visar att klimatet inne är mycket torrt. Det finns ingen fuktproduktion i lokalen. Under de två dygn mätningen varat ligger ånghalten inne konsekvent under ånghalten ute. Ånghalten i spalten är lägre än ånghalten inne. Det saknas förutsättningar för fukt-vandring i taket.

Det var mulet under hela mätperioden.

RELATIV ÅNGHALT



TEMPERATUR °C

ÅNGHALT $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$ 

○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 x-x-x-x PLÅTKANAL

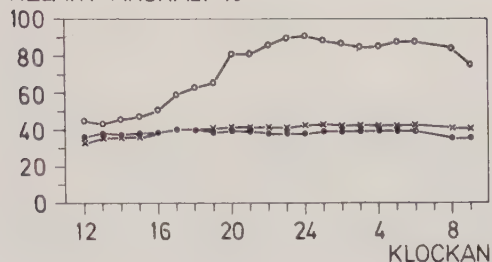
FIG 56. Mätobjekt 5. Ishall Kristianstad 1972-02-22--25.

Konstruktion: papp + 50 mm mineralull + 45 mm plåt.

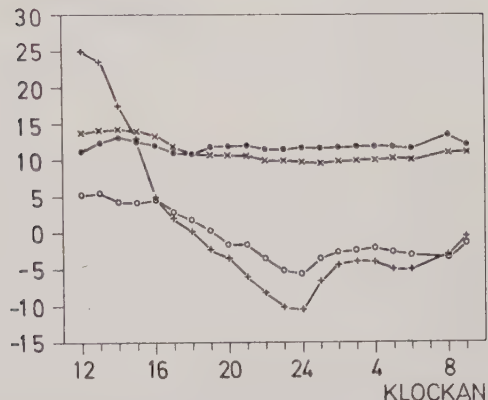
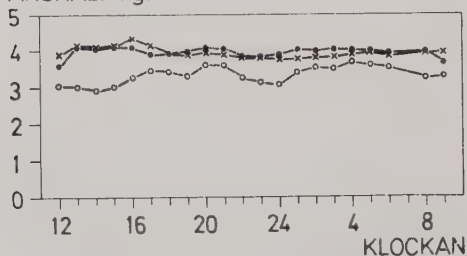
Mätningen har pågått under tre dygn. Ute- och inneånghalterna följer varandra väl. Trots detta skiljer sig ånghalten i plåtkanalen från ånghalten inne vid två tillfällen. Det är vid middagstid de två första dagarna. Detta tyder på att det finns fukt, om än i små mängder i värmeisoleringen. När takytan värms, och uppvärmningen är måttlig eftersom utetemperaturen påverkas så lite som den gör, vandrar fukten i värmeisoleringen ner i plåtkanalen och ökar ånghalten där. Tillskottet syns tydligt i variationen i den relativa ånghalten eftersom temperaturerna inne och i kanalen är nästan helt konstanta.

Det var mulet under alla tre mätdygnen.

RELATIV ÅNGHALT %



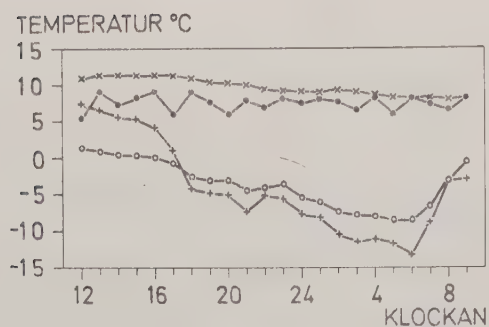
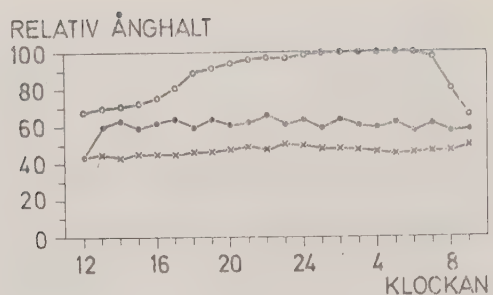
TEMPERATUR °C

ÅNGHALT $\text{kg/m}^3 \cdot 10^3$ 

○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 x-x-x-x PLÅTKANAL
 +--+ TAKYTA

FIG 57. Mätobjekt 6. Livsmedelslager. Sundsvall 1972-03-14--15.
Konstruktion: papp + 70 mm kork + 45 mm plåt.

Vädret var idealiskt under mätdygnet. Under natten var det klart och kallt och på dagen sken solen så att papptemperaturen steg till 25 °. Trots detta varierade inte ånghalten i plåtkanal i förhållande till ånghalten inne. Orsaken är att fuktutbytet med kork sker så mycket långsammare än fuktutbytet med t ex mineralull. Mättiden är således alldeles för kort för att påvisa fuktutbyte med värmeisoleringen.



○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 ×-×-×- PLÅTKANAL
 +--+--+ TAKYTA

FIG 58. Mätobjekt 7. Ostlager. Sundsvall 1972-03-15--16.
Konstruktion: papp + 70 mm kork + 45 mm plåt.

Förhållandena liknar dem vid objekt 6. Första dagen var halvmulen, nästa var helt klar. Trots detta varierar ånghalten i plåtkanalen inte alls.

Ett uttaget fuktprov visade ett fukttinnehåll av $0,22 \text{ kg/m}^2$ eller ca 1 vol% om allt vattnet antas i korken. Detta motsvarar den hygroskopiska jämviktsfuktkvoten.

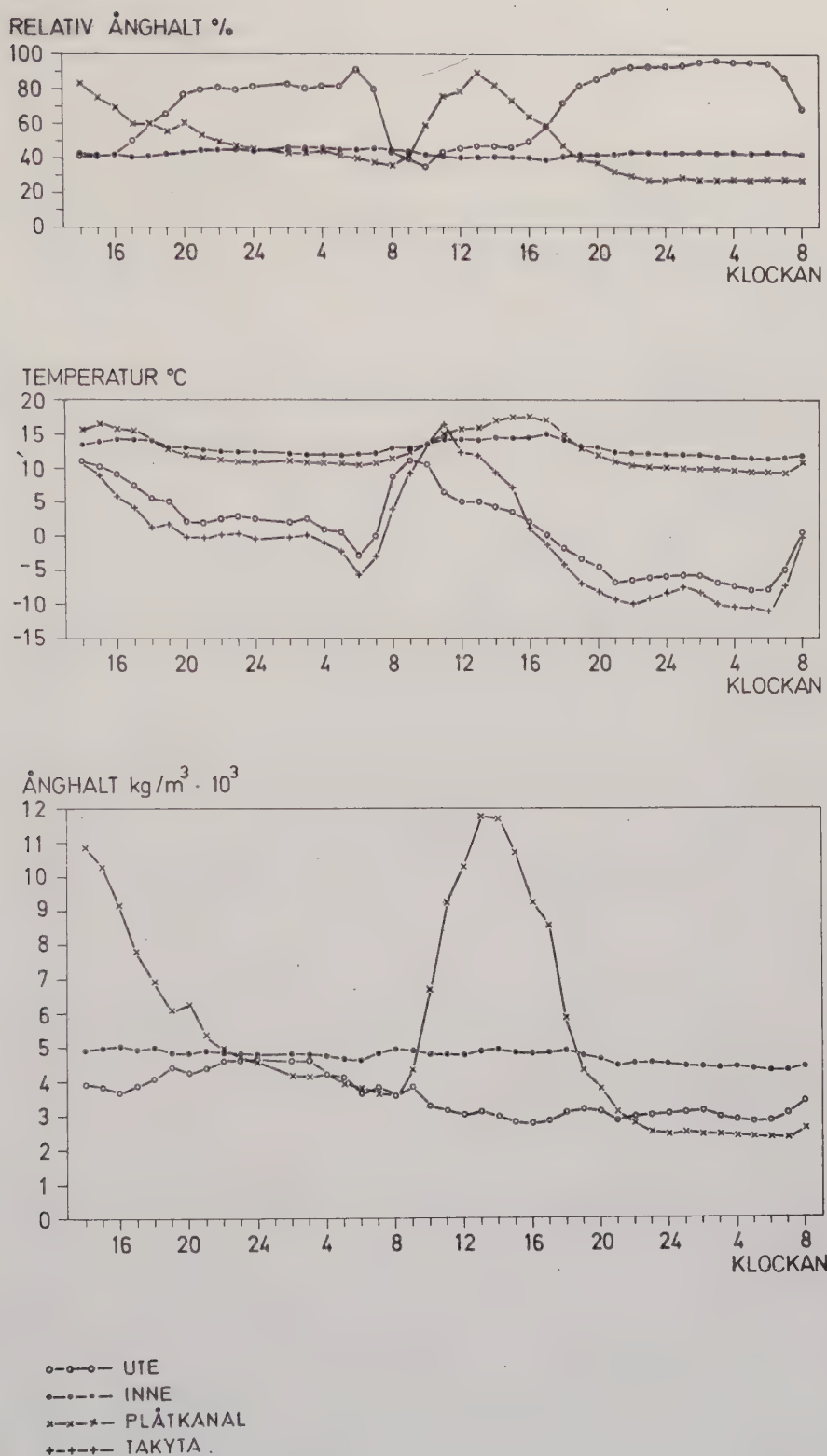


FIG 59. Mätobjekt 8. Fruktlager. Sundsvall 1972-03-16--18.
Konstruktion: papp + 80 mm mineralull + 45 mm plåt.

Vädret var idealiskt under dessa två dygn. Himlen var molnfri och ytttemperaturen på taket var hög under dagen och låg på natten.

Fuktutbytet mellan mineralull och plåtkanal är mycket tydligt. Under morgonen och middagen ökas fukthalten och under natten är ånghalten i plåtkanalen lägre än inneluftens.

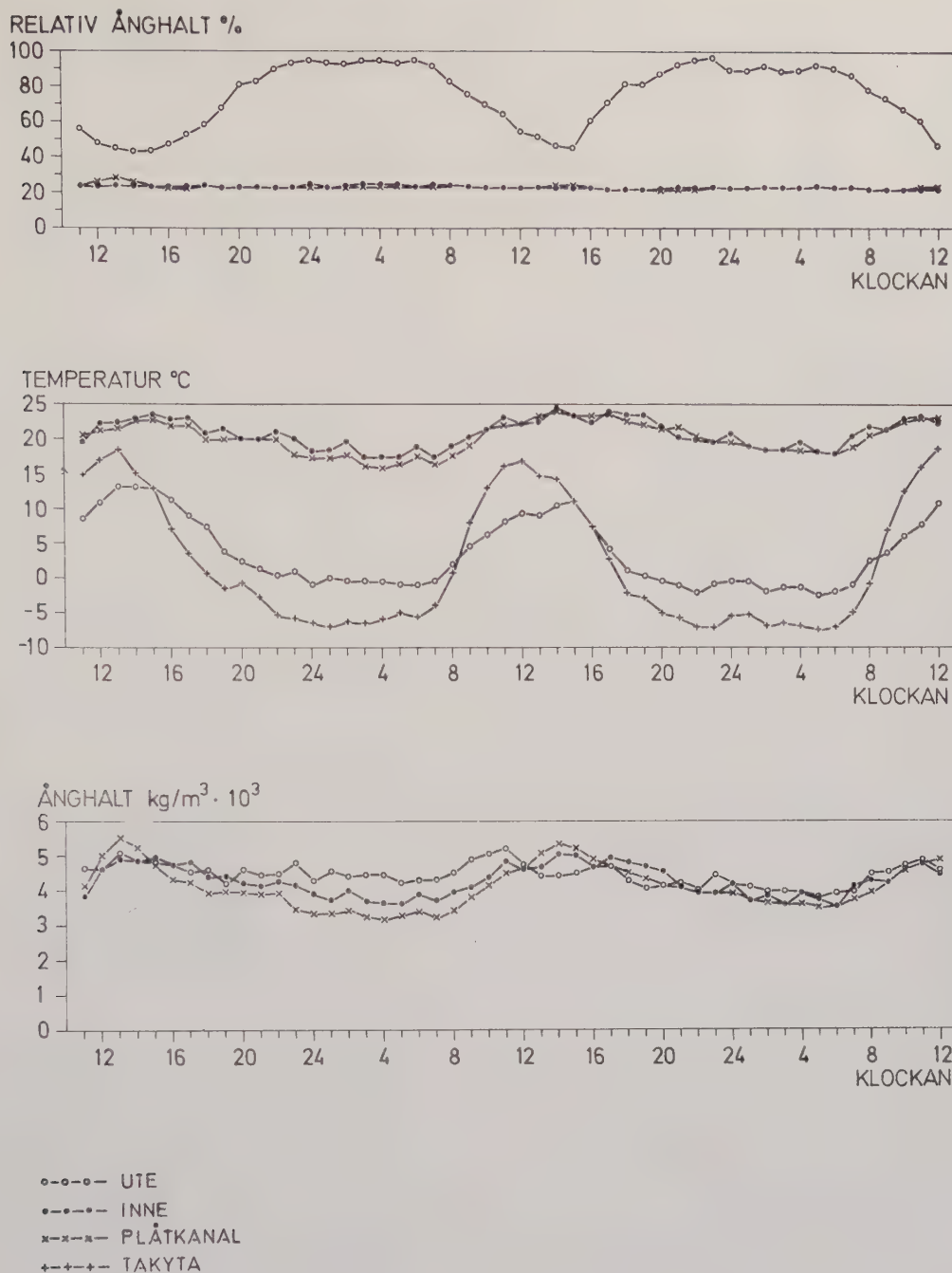
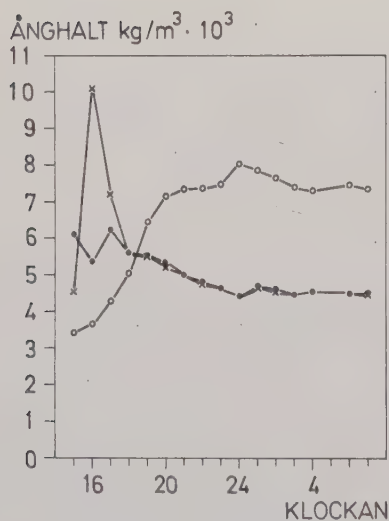
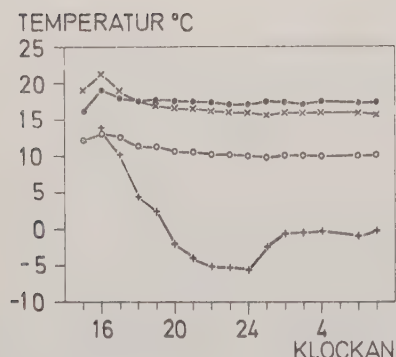
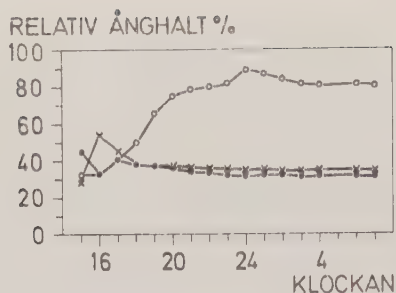


FIG 61. Mätobjekt 10. Bensinstation. Sundsvall 1973-03-18--20.
Konstruktion: papp + 80 mm styrencellplast + 90 mm plåt.

Under de två dygn mätningen omfattar var det klart. Utetemperatur och ytttemperatur på taket varierar kraftigt vilket är en förutsättning för att fuktvariationer i taket skall synas med denna typ av mätning.

Ånghalten i plåtkanalen varierar också något vilket tyder på ett fuktutbyte i taket om inte med värmeisoleringen så dock med fukt i skarvar mellan cellplastskivorna. Ånghalten har maximum samtidigt som takytans temperatur är högst.



○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 ×-×-×- PLÅTKANAL
 +--+--+ TAKYTA

FIG 62. Mätobjekt 11.

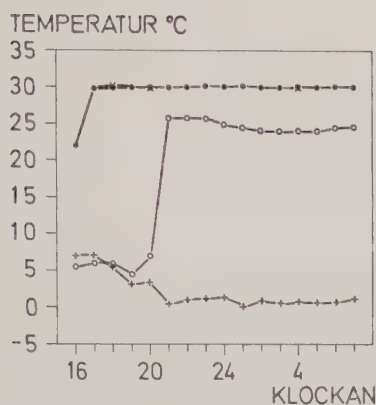
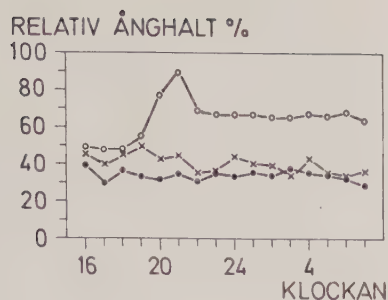
Spolhall Sundsvall
1972-03-20--21.

Konstruktion: papp +
+ 80 mm mineralull +
+ ångspärr + 90 mm
perforerad plåt.

Mätningen är inte helt korrekt. Enligt den skulle utetemperaturen under hela natten ha varit ca 10 °C medan ytttemperaturen på taket var så låg som -5 °C. Det är inte rimligt. Orsaken till felmätningen är att utetemperaturen mättes i närheten av en evakueringsfläkt. Den högre temperaturen från fläkten har stört mätningen. Därmed blir också ånghaltskurvan felaktig vad gäller uteluften.

Vad som är intressant är emellertid det som sker inomhus. Mätningen i spolhallen påbörjades några timmar innan arbetet var slut för dagen. Ånghalten i inneluften och i plåtkanalen varierar kraftigt fram till kl 17 sedan sjunker båda och följs åt utan någon skillnad.

Plåten är perforerad och luften inne har fritt tillträde till plåtkanalen. Något fuktutbyte med värmeisoleringen förekommer inte eftersom taket har ångspärr.



○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 x-x-x- PLÅTKANAL
 +--+--+ TAKYTA

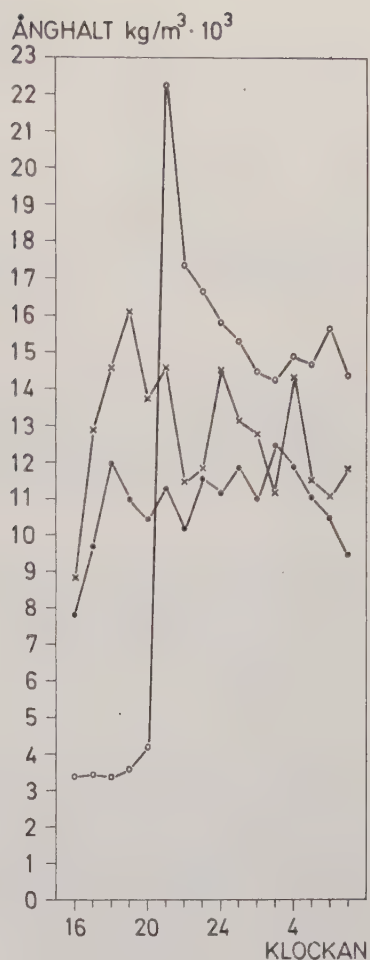


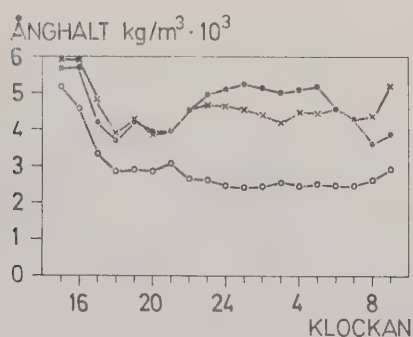
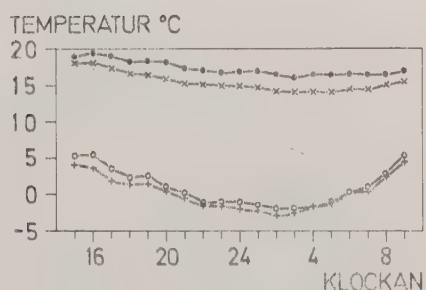
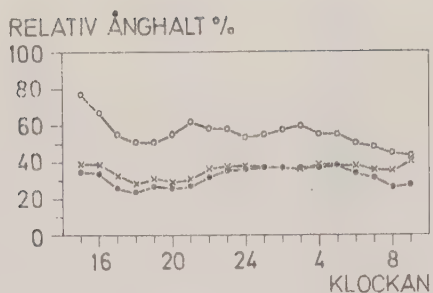
FIG 63. Mätobjekt 12. Strumpfabrik Östersund 1972-03-21--22.

Konstruktion: papp + 80 mm mineralull + ångspärr + 90 mm plåt.

På samma sätt som i föregående objekt har utetemperaturen störts av en evakueringsfläkt. I detta fall startade fläkten kl 20 och gav en "utetemperatur" på 25 °C. Samtidigt var takytans temperatur ca 0 °C.

När mätningen påbörjades var alla mätvärden rimliga. Så snart mätpersonalen lämnat lokalen steg emellertid temperaturen till över 30 °C. Utrustningens mätområde är -20 till +30 °C och de faktiska temperaturerna kunde inte registreras. Vad resultatet ändå säger är att ånghalt och temperatur i plåtkanalen mycket liknar motsvarande värden inomhus. Detta trots att plåten inte är perforerad.

Ångspärren förhindrar fuktutbytet med värmeisoleringen.



○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 ×-×-×- PLÅTKANAL
 +--+--+ TAKYTA

FIG 64. Mätobjekt 13. Sågverk. Sundsvall 1972-03-22--23.

Konstruktion: papp + 80 mm mineralull + 90 mm plåt.

I lokalen förekommer bland annat tvätt av virke innan det sågas. Tillfälligt kan alltså ånghalten stiga. Skillnaden i ånghalt inne - ute är dock måttlig över hela mättiden. Ånghalten inne och i plåtkanalen följs åt ganska väl. Under dagtid är plåtkanals ånghalt högre vilket tyder på fuktvariationer i värmeisoleringen.

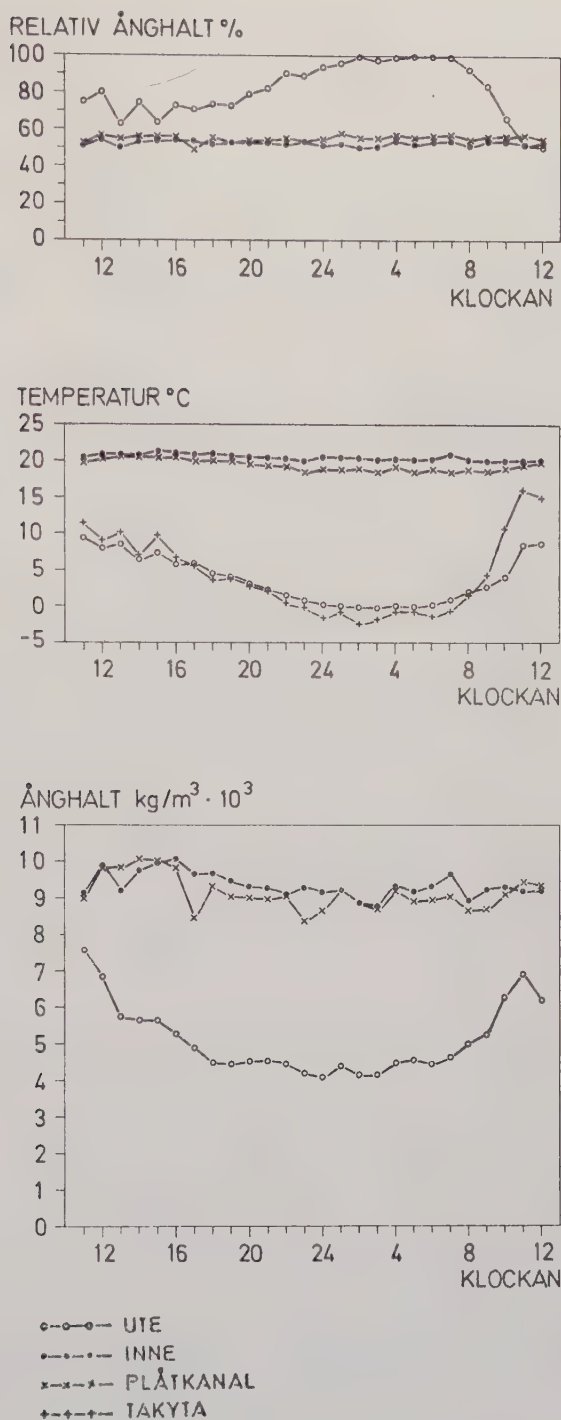
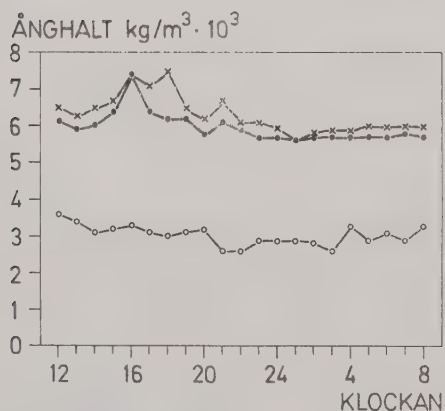
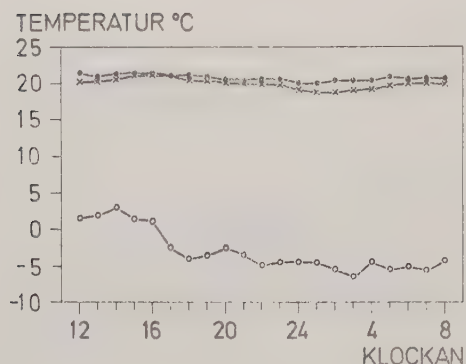
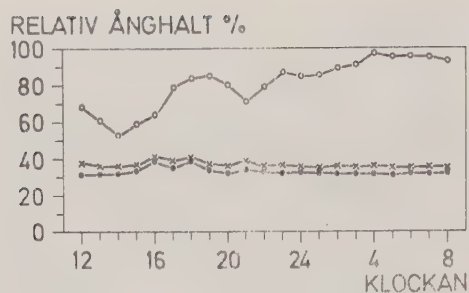


FIG 65. Mätobjekt 14. Datacentral Eskilstuna 1973-03-05--06.
 Konstruktion: rostfri plåt + 100 mm mineralull + ångspärr +
 + 90 mm profil.

Lokalen har s k balanserad ventilation som ger ett svagt övertryck. Verksamheten kräver ganska hög relativ ånghalt och man har befuktat luften till drygt 50%.

Trots att utetemperaturen och takytans temperatur varierar syns ingen egentlig skillnad i ånghalt i plåtkanalen jämfört med inneluftens. Men de båda kurvorna följer varandra väl.

Mätningen visar att ett fuktutbyte äger rum mellan plåtkanal och inneluft.



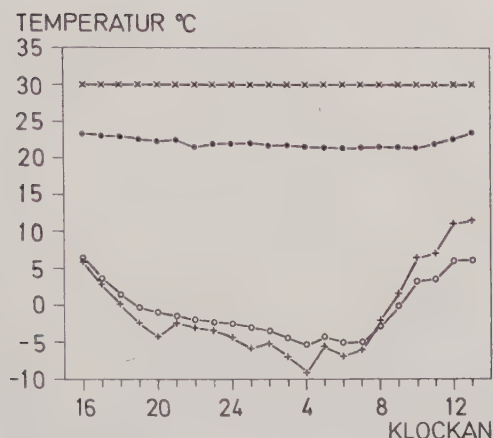
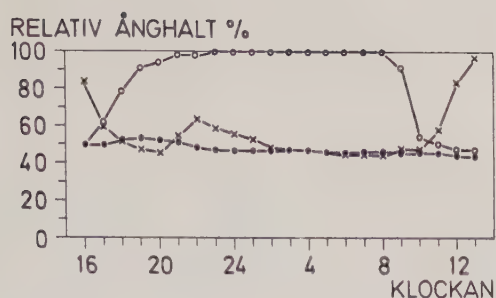
o-o-o- UTE
 •-•-•- INNE
 x-x-x- PLÅTKANAL

FIG 66. Mätobjekt 15. Samma som objekt 14 men mättid två år senare 1975-02-11--12.

I samband med den tidigare mätningen hade man bekymmer med dropp från taket (se avsnitt om skador 2.2.2). Vid denna mätning var det därför intressant att notera vilka förändringar som hade förbättrat förhållandena. Numera fungerar nämligen taket väl.

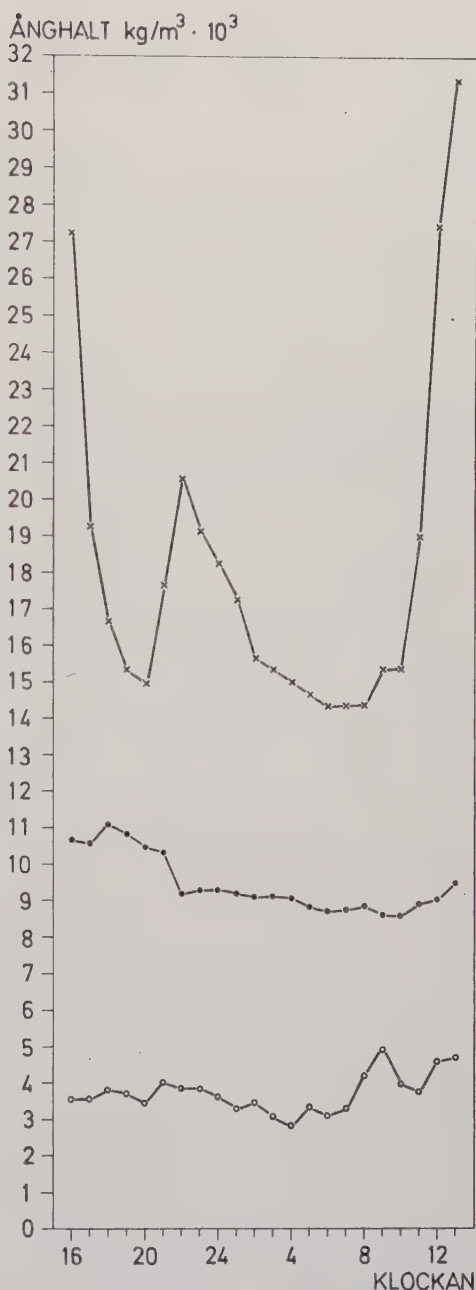
Det som tidigare var ett svagt övertryck var nu svagt undertryck. Den tidigare höga relativa ånghalten över 50% hade sänkts till under 40%.

Fortfarande kan man se hur väl ånghaltsskurvorna följs åt. Något utbyte med värmeisoleringen via fuktspärren observeras inte heller vid denna mätning.



●-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 x-x-x- PLÅTKANAL
 +--+ TAKYTA

FIG 67. Mätobjekt 16.
 Tryckeri Eskilstuna
 1973-03-06--07.
 Konstruktion: papp +
 + 70 mm mineralull +
 + 45 mm plåt.

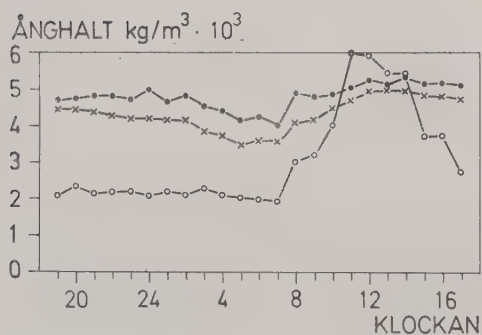
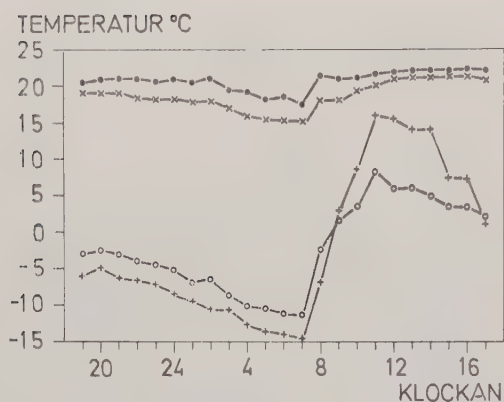
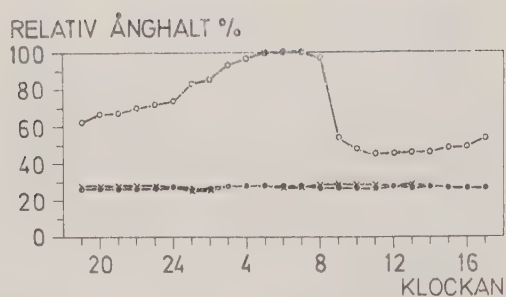


Det har tidigare förekommit dropp från taket. Lokalen är försedd med befuktad luft och under långa perioder med låg temperatur på tätskiktet kan avsevärda mängder fukt ackumuleras i mineralullen.

Det konstaterades vid mätningen att luften har olika temperatur vid golvet och vid taket. Den i figuren angivna innetemperaturen avser förhållanden i golvnivå. Uppe under taket är luften varmare och i plåtkanalen har den temperaturer större än 30 °C. Markerat med = 30 °C.

Trots att temperaturen i kanalen inte är helt rätt får man en uppfattning om fuktutbytet i taket. Under dagen tillförs mycket fukt från isoleringen. Nivån i kanalen är sedan nästan konstant 15 - 20 g/m³ under natten för att åter stiga nästa dag. Fuktvariationerna följer de antagna sambanden. Vad som emellertid skiljer denna mätning från övriga är den stora skillnaden mellan ånghaltsnivån i plåtkanalen och inne nattetid. Den höga ånghalten i taket kan bara förklaras med liten luftomsättning i plåtkanalen.

Vid en fukthaltsmätning i taket uppmättes 0,61 kg/m².



○-○-○- UTE
 - - - - INNE
 x-x-x- PLÅTKANAL
 +--+--+ TAKYTA

FIG 68. Mätobjekt 17. Butikslokal Norberg 1973-03-07--08.

Konstruktion: rostfri bandtäckt plåt + 80 mm mineralull +
+ 45 mm plåt.

Mätvärdet var soligt och klart. Taket har ingen fuktspärr men trots detta påvisas ingen fuktvariation i plåtkanalen p g a tillskott från tätskiktet. Orsaken är inte helt klarlagd.

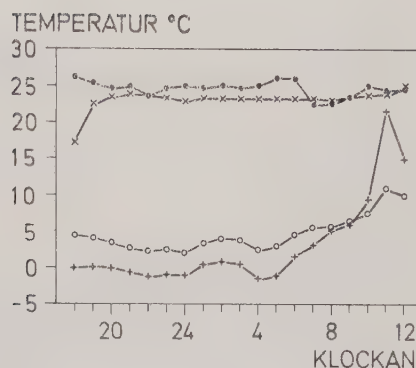
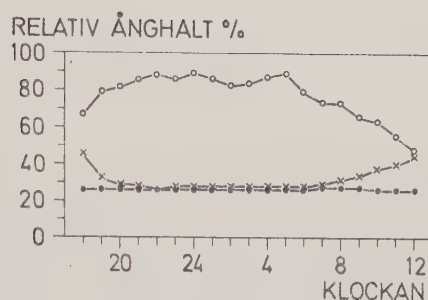


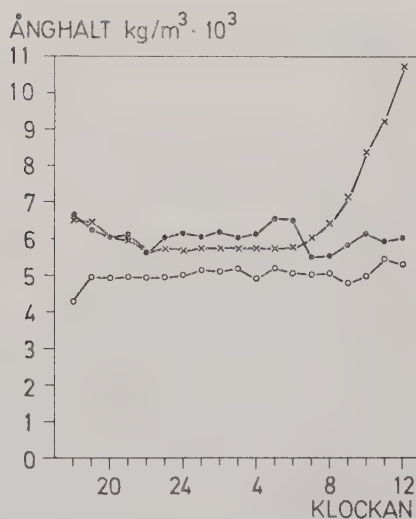
FIG 69. Mätobjekt 18.
Kontor Örnsköldsvik
1973-03-12--13.
Konstruktion: rostfri
bandtäckt plåt + 100 mm
mineralull + ångspärr
(plastfolie) + 45 mm
plåt.

Mätvädret var klart och soligt. Taket har emellertid ångspärr och fuktbelastningen inne är låg varför någon dygnsvariation av ånghalten i plåtkanalen inte borde förekomma. Ända finns sådana.

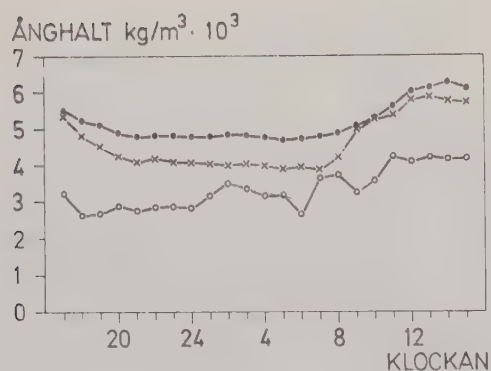
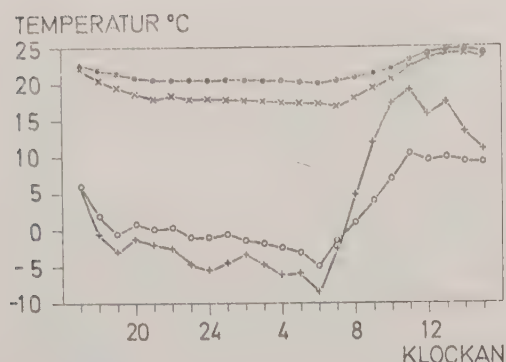
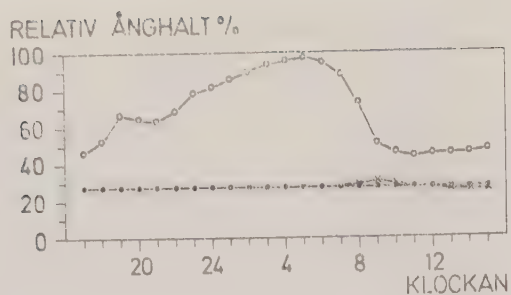
Orsaken är följande. Taket är försett med ett undertak av ganska komplicerat slag. Därför har mätningen gjorts uppifrån genom tätskiktet. I den rostfria plåten skars en öppning och mätgivarna för plåtkanalen lades omedelbart ovanför ångspärren. På mätgivarna lades sedan värmeisoleringen och sist tätades hålet i plåten omsorgsfullt.

Mätningen visar därför att det finns fukt i värmeisoleringen. Denna fukt kan inte transporteras bort utan är inneslängd mellan täta skikt.

Vid mätning av fukthalten kunde dock inte något vatten påvisas. Fuktmängden är alltså mycket liten.



○—○— UTE
×—×— INNE
—— PLÅTKANAL
+—+— TAKYTA



○-○-○- UTE
 ●-●-●- INNE
 x-x-x-x PLÅTKANAL
 +--+--+ TAKYTA

FIG 70. Mätobjekt 19.
 Kontor Västerås
 1973-03-14--15.
 Konstruktion: papp +
 + 80 mm mineralull +
 + 45 mm plåt.

Detta tak har beskrivits under avsnitt 2.2.1. Taket var då fuktigt p g a kondensation. I samband med skadan mättes klimatet inne. Då var relativa ånghalten ca 55% vid 22 °C.

Den här beskrivna mätningen visar att klimatet inne har ändrats. Relativa ånghalten är nu knappt 30%. En mätning av fukthalten i taket gav 0,03 kg/m², vilket motsvarar mineralullens jämviktsfuktkvot.

Ånghalten i plåtkanal följer ånghalten inne ganska väl vilket tyder på god omsättning av luft i taket. Någon kraftig variation av ånghalten p g a fukttillskott från värmeisoleringen vid kondensation kan inte observeras.

TABELL 10. Redovisning av fukthaltsmätningar i några olika tak. Fukthalten anges per ytenhet beroende på att fukten är lokaliserad till ett bestämt skikt i taket.

Objekt nr	Fukthalt kg/m ²	Kommentar
7	0,22	Motsvarar jämviktsfukthalten hos kork.
9	2,35	I detta tak har påvisats kraftiga fuktvariationer. Vid provtagningen observerades is vid tätskiktet.
15	0,61	Vid provtagningen observerades spår av fukt vid pappen. I övrigt verkade mineralullen torr.
17	0,00	Trots att mätningen visar att det finns fukt i taket kunde man inte påvisa mätbara mängder i mineralullen.
18	0,03	Tack vare den låga ånghalten inne är numera fukttinnehållet i taket lågt.

5.1.5 Resultatdiskussion

Det bör observeras att samtliga mätperioder är korta, maximalt några dagar. Mättillfällena är valda så att eventuellt kondensat i taket skall drivas tillbaka ner i taket under någon del av mätningen. Anledningen till detta är en önskan att påvisa just dessa fuktrörelser. Vad som inte har studerats är effekten av en lång köldperiod då mycket fukt har lagrats i taket. Det har å andra sidan simulerats vid laboriemätningar.

Ur resultaten från fältmätningarna kan man dra några intressanta slutsatser.

Slutsats 1: Under största delen av mätperioden är ånghalten i plåtkanalen lika med den inne. Om tillskottsfukt erhålles från kondenserat vatten i värmeisoleringen stiger ånghalten i plåtkanalen och blir högre än den inne. Om takytan är kall transporteras fukt upp i taket och ånghalten kan bli lägre. Mätresultaten stöder hypoteserna rörande fuktbalansen som beskrivits i avsnitt 4.2. Variationen som visas i

figur 33 kan påvisas vid flera av mätningarna men är tydligast i objekt 8 i figur 59.

Ånghaltsvariationerna är tydliga även i fig 54 och 56. Vid övriga mätningar har mätningssbetingelserna varit annorlunda. Några tak har varit försedda med ångspärr, andra har varit ventilerade med uteluft, klimatbetingelserna har varit olämpliga o s v.

I ett tak med ångspärr förhindras fuktutbytet med värmeisoleringen. Tillskottet från kondenszonen vid varmt tätskikt stannar kvar ovanför ångspärren, vilket visas i fig 69. Klimatet i plåtkanalen blir ungefär lika med inneklimatet. Detta förhållande påvisas i bl a figur 65.

Slutsats 2: Endast takkonstruktioner som är isolerade med mineralull ger fuktsvängningar över ett dygn. Detta tyder på att materialets fuktegenskaper spelar en avgörande roll för fuktförloppets hastighet.

Konstaterandet betyder inte att det förekommer fukttransport bara i tak med mineralull. Den är dock tydligast i material som har litet ångmotstånd där fuktutbytet kan ske relativt snabbt.

Slutsats 3: Antagandet om fuktvandring i plåttaket som beskrivs i kapitel 4.1 och som visas i figuren 33 bekräftas av fältmätningarna. Fuktbalansen i kanalen som beskrivs schematiskt av fig 32 har påvisats. Om värmeisoleringsmaterialet har lågt ångmotstånd blir tillskott från resp avgivning till detta stor. Om värmeisoleringen har högt ångmotstånd, t ex kork eller cellplast, blir fuktutbytet mindre. I de fall konstruktionen har ångspärr bryts förbindelsen helt och fuktutbytet med värmeisoleringen förhindras. Fuktutbytet med inneluften sker oberoende av detta.

5.2 LABORATORIEMÄTNINGAR

Vid fältmätningarna påvisades fuktvariationer i plåttak. Vid måttillfällena studerades ånghalten i taket när ute- eller inneklimatet ändrades. Ett bestämt förlopp studerades under en rad yttre inverkanse faktorer. Som komplement till fältmätningarna har därför laboriemätningar utförts där effekten av varje parameter har studerats för sig. Sådana mätningar är nödvändiga för att avgöra de olika faktorer-

nas betydelse.

5.2.1 Fuktbalans i plåttak vid kontrollerade yttre förhållanden

Avsikten med mätningen har varit att påvisa olikheter i fuktrörelserna i plåttak uppbyggda med olika värmeisoleringsmaterial. Försöken har genomförts i ett provtak $3 \times 3 \text{ m}^2$. Taket är beläget mellan två klimatrum. På takets undersida kan inneklimat simuleras och den relativa luftfuktigheten väljas inom rimliga gränser. På ovansidan kan temperaturen regleras ner till -20°C .

Eftersom takets dimensioner är små förekommer inget egentligt luftutbyte mellan plåtkanal och inneluft. Därför har det varit önskvärt att styra tillflödet av inneluft till kanalerna så att förhållanden i praktiken efterliknas. Vid kortändarna av taket borrades hål i profilbottnarna och här blåstes bestämda mängder luft in.

Vid försöket provades samtidigt 6 cm tjocka takskivor av glasull, stenull, kork och polystyren. Skivorna lades noggrant intill varandra för att förhindra springor.

Mätpunkternas läge i taket är identiska med dem vid mätningarna i fält som framgår av fig 50.

I försökets inledningsskede användes punktskrivare för registrering av förloppen, senare användes datalog för insamling av mätvärdena.

I försöket varierades förutom isoleringsmaterialet även relativ ånghalt inomhus, temperatur ute och luftmängd i plåtkanalerna.

Innetemperaturen var 20°C och den relativa ånghalten varierades mellan 30 och 50%. Vid en temperatur på tätskiktet av -10°C kan fuktighetsvariationen översättas till en variation i ånghaltsskillnaden $c_i - c_s$. Skillnaden blir $3,0 \cdot 10^{-3}$, $4,8 \cdot 10^{-3}$ och $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ vid respektive 30, 40 och 50% relativ ånghalt inne.

Klimatet varierades under mätningen på följande sätt. Vid provstart var materialen torra och ute- och innetemperatur lika. Sedan sänktes

utetemperaturen och hölls konstant under en bestämd tid då fukten från plåtkanalerna vandrade upp i taket och kondenserade mot tätskiktet. Därefter värmdes takytan med strålningsvärmare för att kondensfukten skulle vandra tillbaka ner i plåtkanalerna. Utetemperaturen hölls konstant = -10°C under "kondensationsperioden". Under "solstrålningsperioden" varierades temperaturen. "Kondensationsperioden" hade i de flesta fall längden 1 dygn men försök har genomförts med 2, 3, 4 och upp till 20 dygn. Solstrålningsperioden inleddes med en temperaturhöjning på tätskiktet från -10 till $+20^{\circ}\text{C}$ mellan kl 6 och kl 12. Sedan hölls temperaturen vid denna nivå till kl 16 varefter temperaturen sänktes för att kl 18 vara -10°C . Temperaturförloppet är för övrigt samma som användes vid datorberäkningarna, fig 9. Valet av temperaturvariation har skett efter utvärderingen av fältmätningarna då temperaturer liknande dessa uppträdde. Uppvärmningen av taket skedde med strålningsvärmare så placerade att den instrålade effekten blev ca 600 W/m^2 . Kylningen skedde konvektivt med kyld luft från klimatrummets kylaggregat.

Luftmängden reglerades så att lufthastigheten i kanalerna ändrades mellan $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ och ca $5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$. Dessa lufthastigheter skall jämföras med den luft som strömmar genom en normal plåtskarv vid en tryckskillnad av 2 - 3 Pa och då fås hastigheten ca $0,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$. Den högre hastigheten $5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ som används i försöksserien skall påvisa eventuella skillnader från "normal" lufttillförsel.

I det följande beskrivs var för sig effekten av olika faktorer.

5.2.2 Inverkan av olika isoleringsmaterial

De olika fuktegenskaperna hos materialen ger helt olika förutsättningar för fukttransport och därmed också fuktvariationer i plåtkanalerna. Detta illustreras i samtliga försök och som exempel visas i figur 71 en jämförelse mellan materialen efter ett dygns kondensation vid en skillnad i ånghalt av ca $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$. Lufthastigheten har varit $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$. Figuren visar hur ånghalten i plåtkanalerna varierar under uppvärmningen.

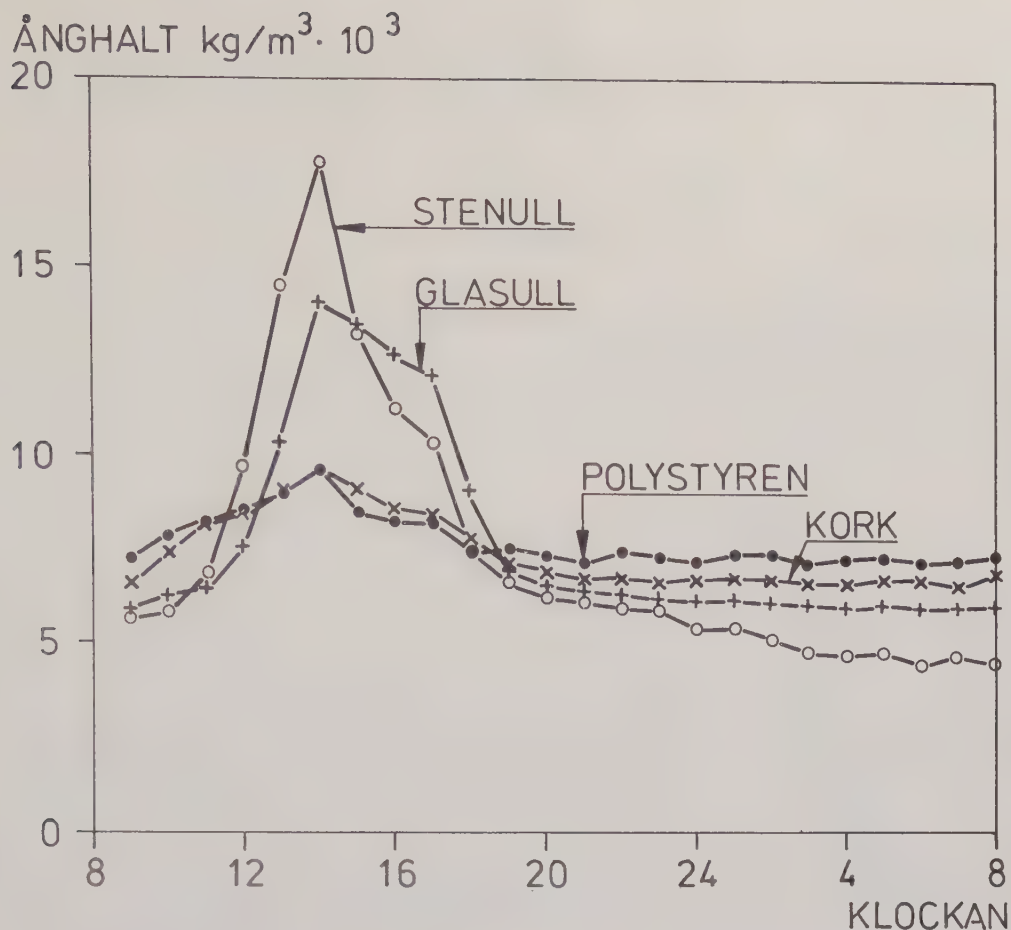


FIG 71. Ånghaltvariationer i tak isolerade med olika material.

Variationen i ånghalt i de mineralullsisolerade taken tyder på ett kraftigt fuktutbyte mellan plåtkanal och värmeisolering. Detta är mindre tydligt för tak med övriga material.

5.2.3 Inverkan av olika kondensationsperioder

I figur 72 visas ånghalten i spalten i stenullsisolerat tak vid tre olika försök. Ånghaltsskillnaden inne - ute har varit ca $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, ventilationsgraden har varierat mellan 0,3 och 1,0 m/s och kondensationsperioden har varit 1 dygn, 2 och 3 dygn. Vid mätningen i kurva I har "ute"-temperaturen ändrats från -10°C kl 8, stigit till ca 20°C kl 12, varit konstant till kl 16 och sedan sänkts till -10°C igen. Vid de övriga mätningarna har taket hållits

uppvärmt från kl 12 under det följande dygnet för att det skulle torka ut. Därför får kurvorna II och III ett något annorlunda förlopp än I efter kl 16.

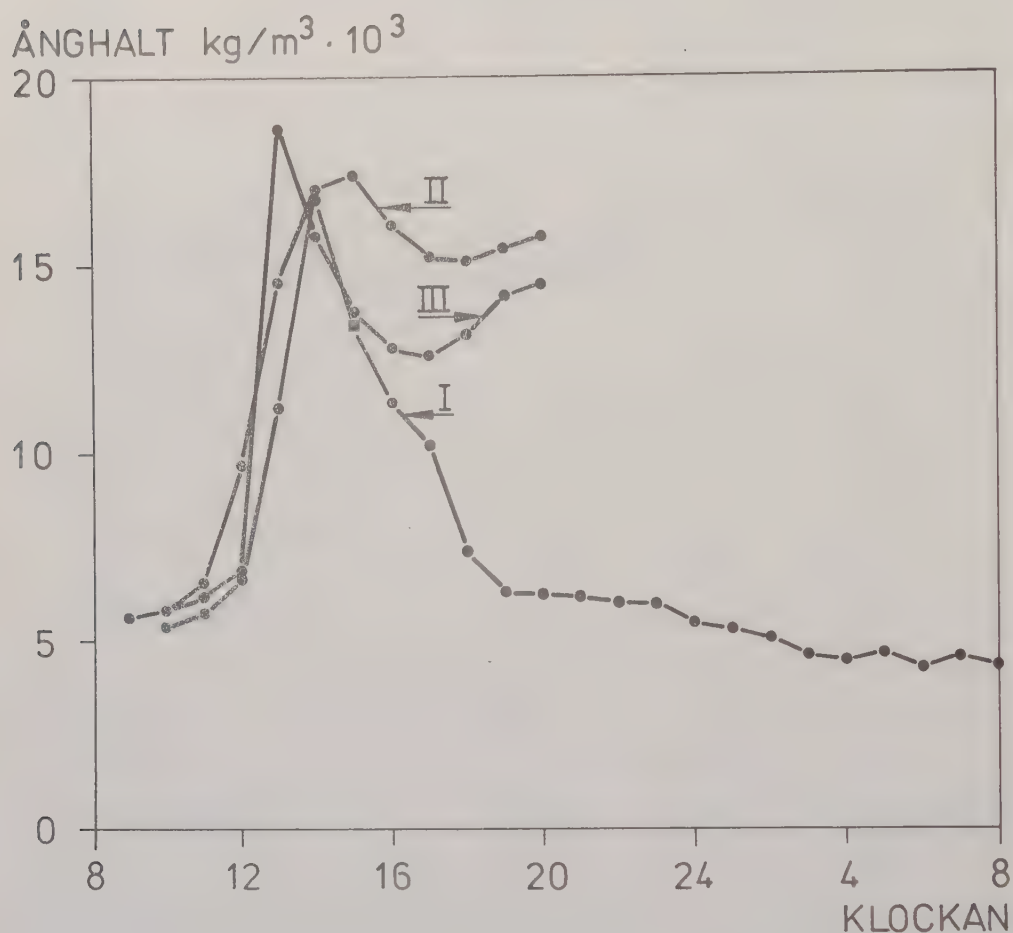


FIG 72. Ånghaltsvariation i tak isolerat med stenull efter olika lång kondensationstid. Figuren visar ånghaltsvariationen under uppvärmning.

Kurvorna ser ungefär likadana ut. Ånghalten stiger till samma nivå och ändras därefter beroende på temperaturvariationen på takytan. Det finns ingen påtaglig skillnad mellan kurvorna vilket tyder på att den mängd vatten som kondenserar i taket under ett dygn eller längre är större än den som vandrar nedåt vid uppvärmningen mellan 8 och 16. Detta kan man konstatera med en beräkning:

Kondenserad fuktmängd i 5 cm stenull under 16 timmar blir om man förutsätter stationära förhållanden

$$g_{\text{kond}} \cdot \tau_1 = \frac{c_i - c_s}{Z} \cdot \tau_1 = \frac{(17,28 \cdot 0,5 - 2,14) \cdot 10^{-3}}{0,05/120 \cdot 10^{-7}} \cdot 3600 \cdot 16 =$$

$$= 9 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2$$

Uttorkad fuktmängd under 8 timmar uppskattas på liknande sätt. Stationära förhållanden med 20 °C, 100% RF vid tätskiktet och 20 °C, 50% RF vid undersidan förutsättes.

$$g_{\text{tork}} \cdot \tau_2 = \frac{c_s - c_i}{Z} \cdot \tau_2 = \frac{(17,28 - 17,28 \cdot 0,5) \cdot 10^{-3}}{0,05/120 \cdot 10^{-7}} \cdot 3600 \cdot 16 =$$

$$= 6 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2$$

Under dessa antaganden spelar det således ingen roll för kurvornas utseende hur lång kondensationsperioden är. Det som påverkas är tiden till fullständigt uttorkat tak.

5.2.4 Inverkan av luftrörelser

I provserien har "ventilationen", luftrörelserna, varit dels av samma storleksordning som "normalt" förekommer i praktiken, dels ca 10 gånger större.

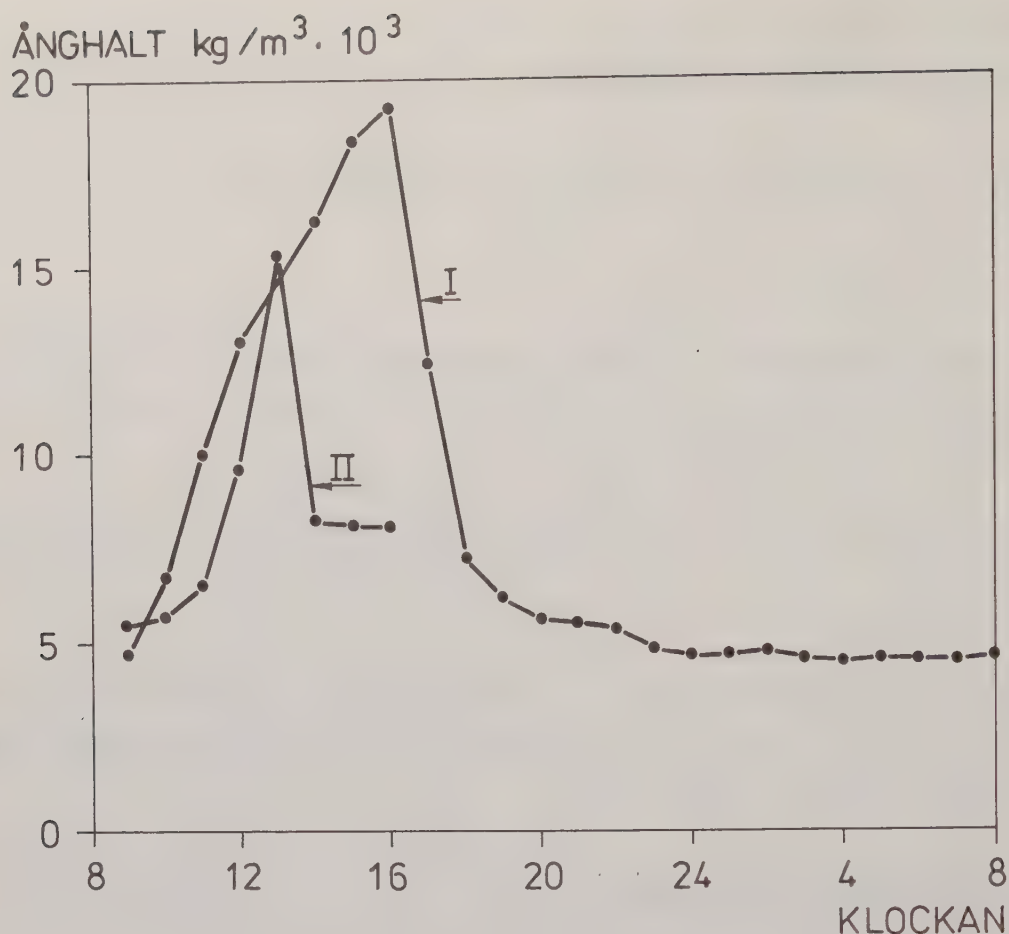


FIG 73. Ånghaltens variation under uppvärmningen i ett stenullsisolerat tak med dels "normal" (I) dels kraftig (II) lufttillförsel.

Effekten av ventilationen är tydlig och visas i fig 73. Vid låg luftomsättning (I) i kanalen påverkas fukttinnehållet i luften av tillskottet från värmeisoleringen längre tid än då luftomsättningen är hög.

5.2.5 Inverkan av olika ånghalt inne

När ånghalten inne varierar ändras också förutsättningarna för kondensation i värmeisoleringen. Låg ånghalt ger liten ånghaltsdifferens och liten mängd beräkningsmässig kondens. Återtransporten av fukt blir däremot snabbare eftersom en låg ånghalt inne ger större ånghaltsdifferens vid uttorkning. Detta gäller under förutsättning att ånghalten vid tätskiktet är 100%. Uttorkningen blir intensivare ju lägre ånghalten är inomhus. Ökningen i ånghalt i plåtkanalerna blir kraftig även om kondensmängden inte har varit så stor.

Kondenserad fuktmängd under 16 timmars stationära förhållanden g_{kond} blir under samma antaganden som i avsnitt 5.2.3

$$g_{\text{kond}} \cdot \tau = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2$$

Uttorkad fuktmängd under 8 timmars stationära förhållanden med 20 °C, 100% vid tätskiktet och 20 °C 30% på undersidan blir

$$g_{\text{tork}} \cdot \tau = 7,0 \cdot 10^{-2} \text{ kg/m}^2$$

Försöken visar och beräkningen bekräftar att en låg ånghalt inomhus ger en kraftigare uttorkning och därmed en kraftigare topp i ånghaltskurvan. Förhållandet illustreras av fig 74. Kurva I visar förloppet vid en ånghaltsdifferens ute - inne av $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ och kurva II vid en ånghaltsdifferens av $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.

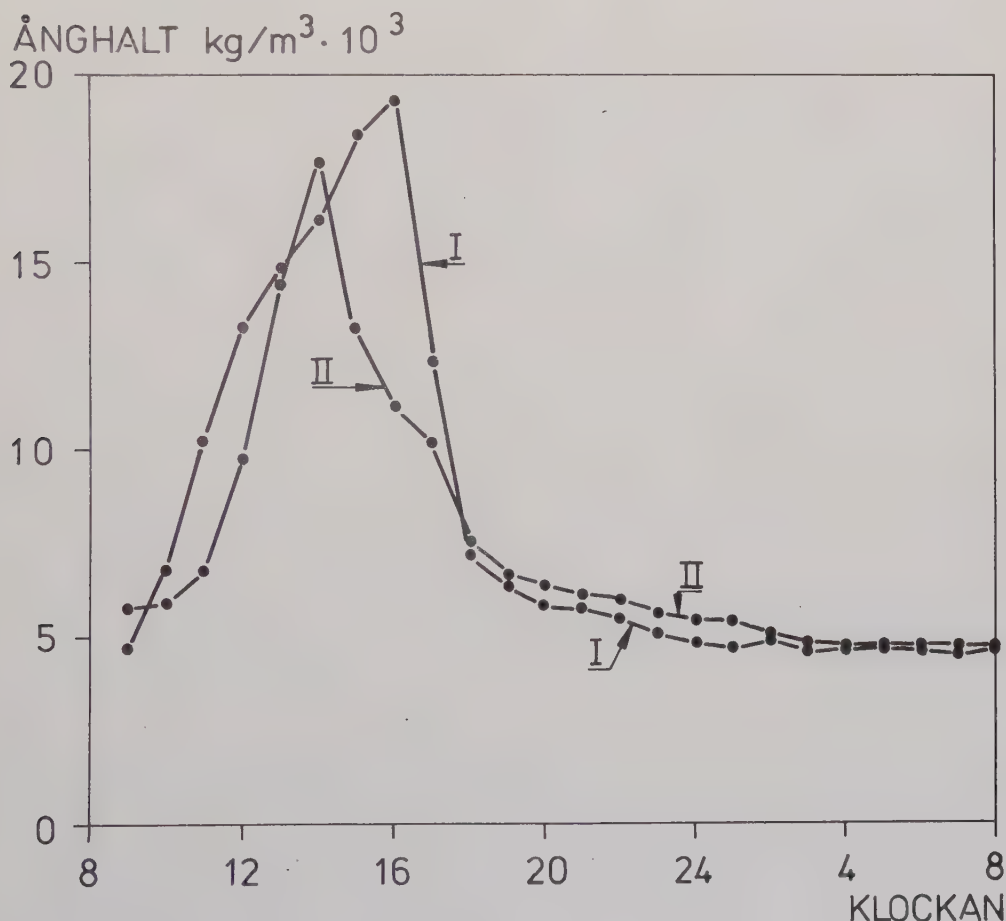


FIG 74. Ånghaltsvariationer i plåtkanalen i ett mineralullsisolerat tak utsatt för en ånghaltsdifferens av $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, kurva I, resp $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, kurva II. Figuren gäller för uppvärmningsskedet.

6 KONSTRUKTIONSKRITERIER

Av mätningar och beräkningar i det tidigare framgår att takets funktion bestäms av en rad faktorer. Att bedöma behovet av ångspärr utan att ta hänsyn till alla dessa är att förenkla problemet.

Risken för skador bestäms av

1. ånghaltsskillnaden inne - mätnadsånghalten vid tätskiktet
2. kondensationsperiodens längd
3. antal nollpunktspassager
4. material
5. konstruktionsutförande, lägningsmetod
6. lufttäthet hos hela konstruktionen
7. lufttrycksförhållanden inne

(1) tillsammans med (2) ger mängden kondensat i taket vid ett och samma tillfälle. (3) anger risken för att fruset kondensat skall smälta och droppa ner. Olika material har olika fuktegenskaper. Detta skall man ta hänsyn till vid projekteringen (4). Lägningsmetoden (5) kan innebära ändrade förutsättningar för fukttransport. Ventilationssystemet kan ge luftrörelser i taket och övertryck inne och otätt tak kan ge genomblåsning.

Följande skadetyper kan förekomma

- försämring av värmeisoleringsförmågan
- dropp från taket
- förändring av vidhäftningen
- fuktkonvektion (kan ge samma typ av skador som de tidigare, men förloppet är snabbare).

Man kan ställa följande kriterier

- 1 Värmeisoleringsförmågan får inte försämrats över en bestämd nivå.
- 2 Dropp från taket kan accepteras n ggr/år
- 3 Vidhäftningsförsämring accepteras inte.

6.1 KRITERIUM OM VÄRMEISOLERINGSFÖRSÄMRING

Så snart fukt vandrar upp i värmeisoleringen påverkas isoleringsförmågan. Mängden kondensat dimensionerar taket ty denna mängd ger en bestämd k-värdesförsämring. Diagrammen i figurerna 75 - 77 visar sambanden mellan kondensmängd och isoleringsförsämring. I diagrammen ingår ånghaltsskillnaden inne - tätskiktet och kondensperiodens längd. Vid projektering av tak bör man använda dimensionerande värden för kondensperioden, men diagrammet kan också användas för beräkning av tillfällig värmeisoleringsförsämring under en speciell period. Dessa bägge parametrar ger kondensmängden och därmed också isoleringsförsämringen för vart och ett av materialen.

Några exempel nedan visar hur diagrammen kan användas.

- . Exempel 1. Tryckeri i mellansverige, önskat k-värde max 0,4. Vilken tjocklek på isoleringen bör man välja för att värmegenomgången vid dimensionerande tidpunkt inte skall överstiga detta värde?
- . För torrt material erfordras tjockleken $d = 0,10$. k-värdesökningen kan uppskattas ur diagrammet om $c_i - c_s$ antas till $8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ och T_k antas vara 60 dygn. Med dessa värden insatta i övre delen av figuren för mineralull fås den dimensionerande kondensmängden. Denna används i nedre delen av diagrammet för bestämning av erforderlig tjocklek om värmeisoleringen är nedfuktad av kondens. En uppskattning i figuren ger $d = 0,11$.
- . Exempel 2. Vilken värmeförlust får man genom ett gammalt tak med 4 cm mineralull vid dimensionerande kondensation? Taket ligger i södra Sverige med $T_k = 40$ dagar och ånghaltsskillnaden $c_i - c_s$ uppskattas till $4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$.
- . Ur diagrammet får man $k = 1,05$ dvs en värmegenomgång som är ca 25% högre än värmegenomgången för torrt material.

Diagrammen anger maximal isoleringsförsämring under kondensation. Om man kan uppskatta medelkondensperioden under eldningssäsongen kan man uppskatta medelvärdet av värmegenomgången med hänsyn tagen till kondensation. Kostnaden för den extra värmeförlusten skall ställas i relation till antingen kostnaden för ångspärr eller kostanden för tjockare isolering.

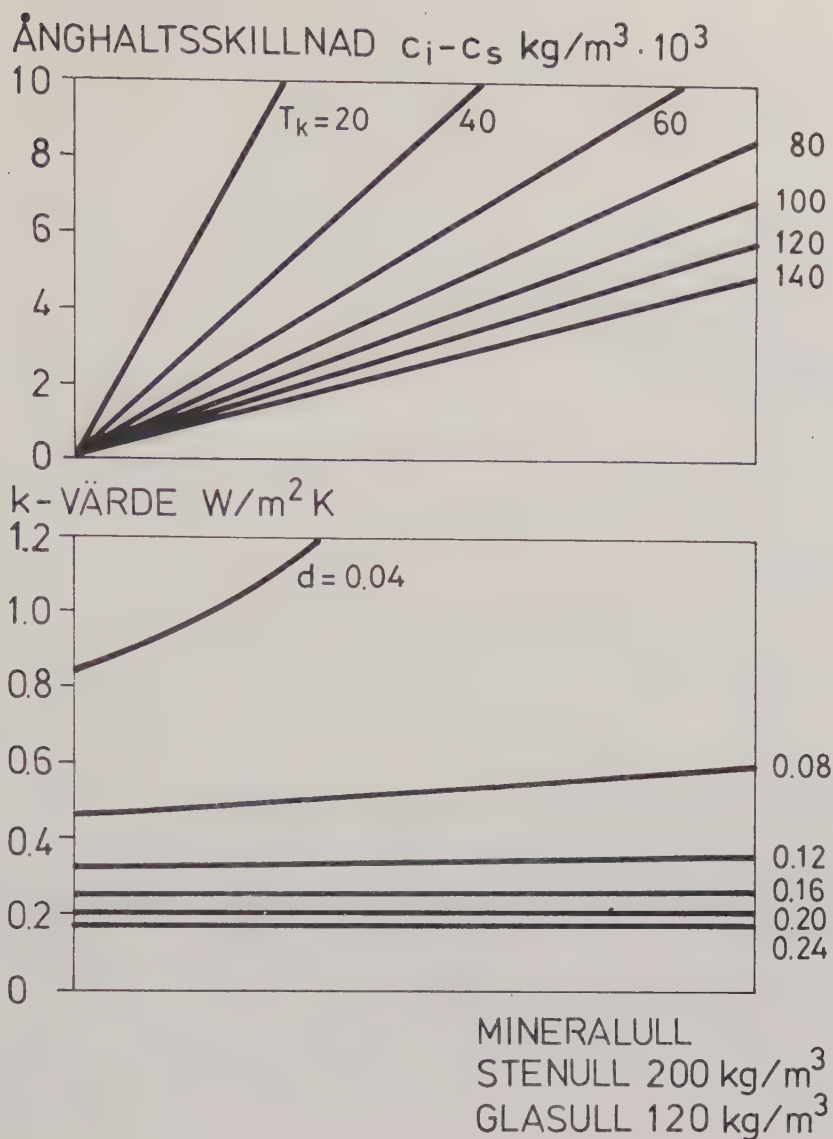


FIG 75. Nomogram för beräkning av värmegenomgång i tak med hänsyn tagen till kondensation. Den dimensionerande kondensations-tiden T_k anges i dagar, isoleringstjockleken d i meter. I beräkningen av k -värde har förutom värmeisoleringens värmemotstånd även medtagits pappens $m_p = 0,05$ och övergångsmotståndet $m_i + m_u = 0,17$. Isoleringens λ -värde har satts till $0,041$.

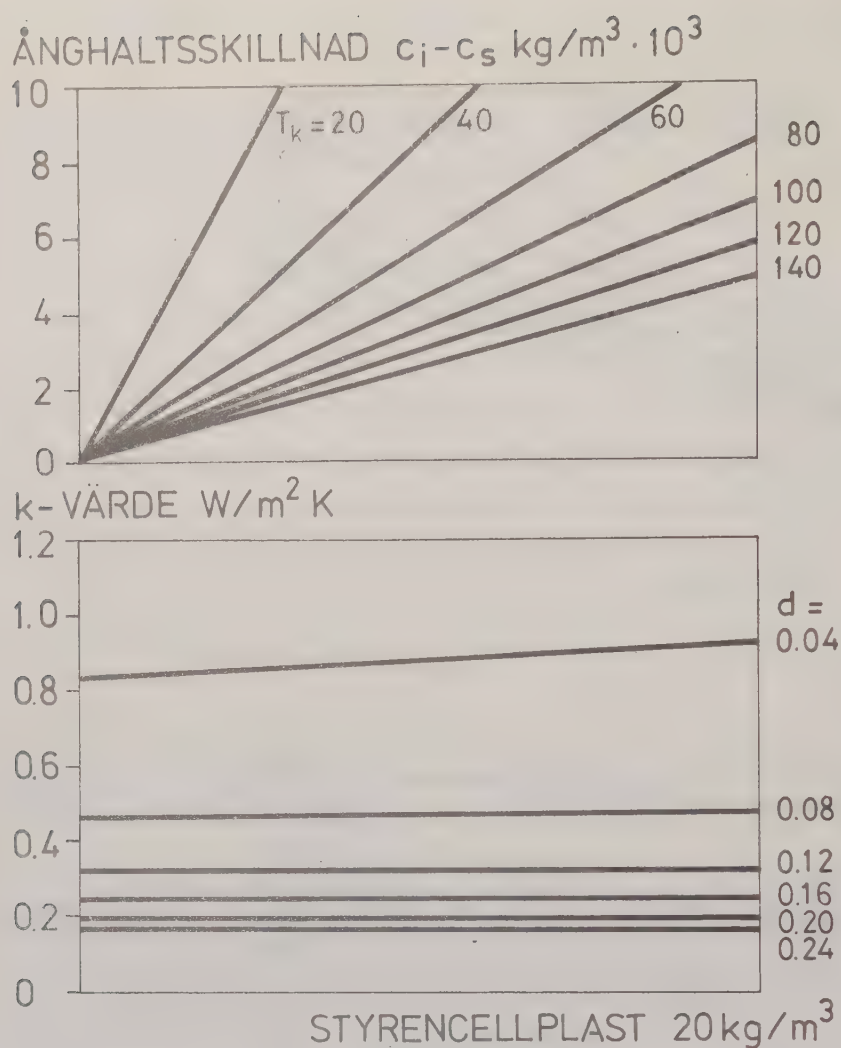


FIG 76. Nomogram för beräkning av värmegenomgång i tak med hänsyn tagen till kondensation. Den dimensionerande kondensations-tiden T_k anges i dagar, isoleringstjockleken d i meter. I beräkningen av k -värde har förutom värmeisoleringens värmemotstånd även medtagits pappens $m_p = 0,05$ och övergångsmotståndet $m_i + m_u = 0,17$. Isoleringens λ -värde har satts till $0,041$.

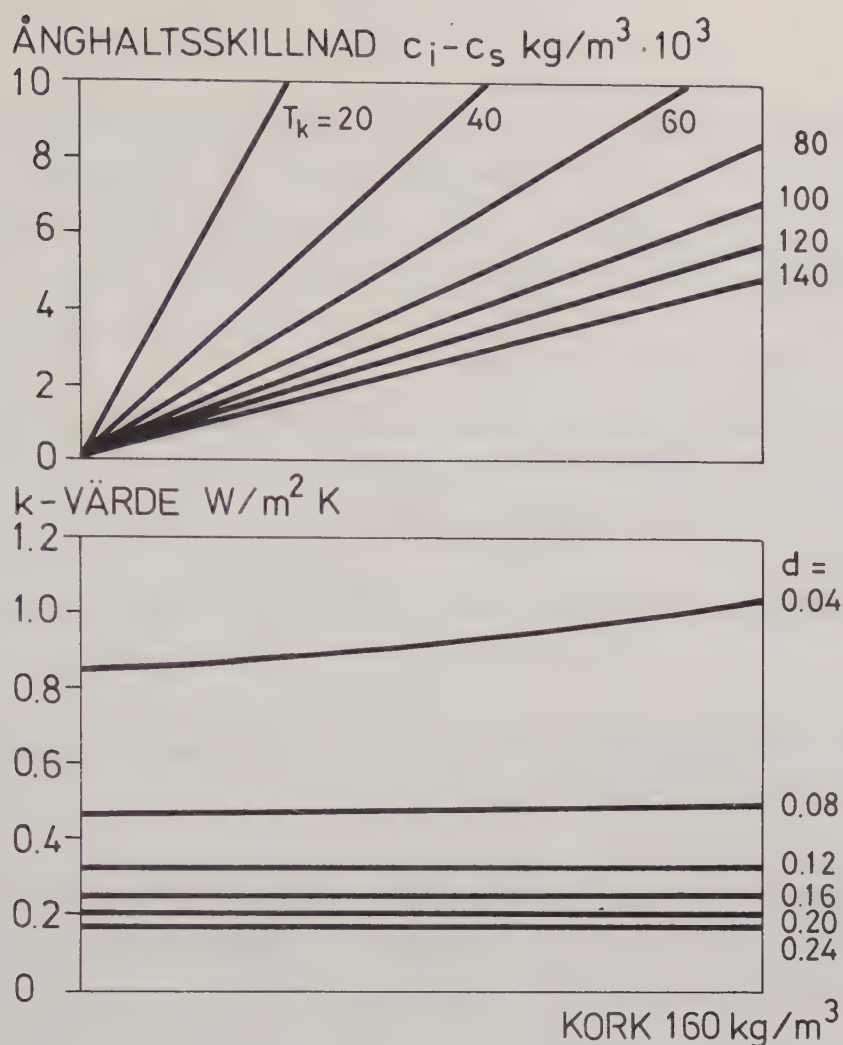


FIG 77. Nomogram för beräkning av värmegenomgång i tak med hänsyn tagen till kondensation. Den dimensionerande kondensations-tiden T_k anges i dagar, isoleringstjockleken d i meter. I beräkningen av k -värde har förutom värmeisoleringens värmemotstånd även medtagits pappens $m_p = 0,05$ och övergångsmotståndet $m_i + m_u = 0,17$. Isoleringens λ -värde har satts till $0,041$.

6.2 KRITERIUM OM DROPP FRÅN TAKET

Dropp kan uppkomma om takets värmeisolering är lagd med breda springor. Under perioder med kyla dvs då takytans temperatur är under noll samlas kondensatet under tätskiktet i form av is. Vid tö smälter isen och kan transporteras från tätskiktet på något av följande sätt:

- absorberas av värmeisoleringsmaterialet
- rinna ner utefter värmeisoleringen, till viss del absorberas, till viss del droppa ner i plåtkanalen
- droppa ner direkt i plåtkanalen

Material och läggningssätt påverkar transportsättet och därmed risken för dropp.

Med normal läggningsnoggrannhet blir springorna mellan isoleringsskivorna av storleksordningen högst 5 mm.

Om kondensationsperioden $T_k > 5$ dagar är risken stor att kondensatet i breda springor kan droppa ner vid väderomslag. Sådana kondensationsperioder förekommer i hela landet.

Väderomslag från kyla till tö förekommer höst och vår i norra Sverige och hela vintern i mellersta och i södra delen av landet.

Risken för dropp är således stor under senvintern och våren i Norrland och under hela vintern i övriga delen av landet.

Om dropp inte accepteras kan man välja någon av följande åtgärder.

- ångspärr
- vattenavledning på plåtens undersida

Om man vill begränsa omfattningen av dropp kan man

- lägga värmeisoleringen i flera lager och förskjuta skarvarna i förhållande till varandra.
- byta från kork eller cellplast till mineralull
- kräva stor noggrannhet vid läggningen.

6.3 KRITERIUM OM VIDHÄFTNINGSFÖRSÄMRING

Förekomsten av fukt i taket ställer krav på ingående material. Klistringsskikten får inte påverkas av fukten, isoleringens eller tätskiktens egenskaper får inte ändras med tiden och mekaniska infästningar eller andra detaljer får inte korrodera eller förändra sina egenskaper på annat sätt.

Kriteriet gäller ingående material snarare än konstruktionen. Om man riskerar vidhäftningsförsämring eller dålig beständighet hos något material kan man antingen byta material eller kräva ångspärr i taket.

LITTERATUR

Bader et al, 1939. Der Schnee und seine Metamorphose. Kümmerly & Frey. Bern.

Bankvall, C., 1970. Ensidig, evakuerbar och roterbar plattapparat för värmeisoleringsundersökningar. Institutionen för byggnadsteknik, LTH, rapport 14. Lund.

Bankvall, C., 1971. Värmetransport i fiberisolerade konstruktioner. Institutionen för byggnadsteknik, LTH, rapport 25. Lund.

Bankvall, C., 1972. Natural Convective Heat Transfer in Insulated Structures. Division of Building Technology, Lund Institute of Technology. Report 38. Lund 1972.

Bankvall, C., Sandberg, P I., 1972. Vind. Kompendium i Byggnadsteknik I, LTH. Lund 1972.

Catton, I., Edwards, D.K., 1967. Effect of Side Walls on Natural Convection between Horizontal Plates Heated from Below. Journal of Heat Transfer p 295 - 299. November 1967.

Dick, J., 1950. The fundamentals of natural ventilation of houses. Inst. Heat. Vent. Engineers 18. 1950.

Glaser, H., 1958 a. Wärmeleitung und Fechtigkeitsdurchgang durch Kühlraumisolierungen. Kältetechnik 10 (1958) Heft 3 p 86.

Glaser, H., 1958 b. Temperatur- und Dampfdruckverlauf in einer homogenen Wand bei Feuchtigkeitsausscheidung. Kältetechnik 10 (1958) Heft 6 p 174.

Glaser, H., 1958 c. Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. Kältetechnik 10 (1958) Heft 11, 12 p 358, 386.

Glaser, H., 1959. Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. Kältetechnik 11 (1959) Heft 10 p 345.

Holmgren, O., 1968. Snölast på tak. Metodstudie. Byggeforskningens informationsblad 38/68. Stockholm.

Höglund, I., 1963. Högisolerande ytterväggars värmemotstånd. Institutionen för Byggnadsteknik, KTH. Meddelande nr 30. Stockholm.

Jespersen, H.B., 1952. Fugtige materialers varmeledningstal. Varme nr 3. Köpenhamn.

Mellor, M., 1964 a. Snow and Ice on the Earth's Surface. CRREL Hanover, New Hampshire US.

Mellor, M., 1964 b. Properties of Snow. CRREL Hanover, New Hampshire US.

Nakaya, U., 1954. Snow Crystals Natural and Artificial. Cambridge Mass. Harvard University Press.

Nevander, L E., Bankvall, C., 1968. Värme. Kompendium i Byggnadsteknik I, LTH. Lund.

Nevander et al, 1968. Fukt. Kompendium i Byggnadsteknik I, LTH. Lund.

Sandberg, P I., 1973. Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH. Report 43. Lund.

Sarapik, O., 1964. Luftmotstånd och luftgenomsläpplighet i längsgående skarv mellan trapetskorrugerade plåtar. 4 st internrapporter 64-10-02, 64-10-15, 64-10-21, 64-10-27. Rockwool AB, Skövde.

Scott, R F., 1964. Heat Exchange at the Ground Surface. CRREL Hanover, New Hampshire, US.

SMHI. Årsböcker. Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Stockholm.

Stålbyggnadsinstitutet 1971. Utvändigt isolerade plåttak.
Forskning- och utvecklingsuppgifter, Stockholm.

Taelser, R., 1972. Klimatdata för Sverige. Statens Institut för
Byggnadsforskning, Stockholm.

